



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VÝVOJ PROCESNÍCH PARAMETRŮ SLITINY MĚDI PRO  
3D TISK TENKOSTĚNNÝCH STRUKTUR**

PROCESS PARAMETERS DEVELOPMENT FOR COPPER THIN WALLS MANUFACTURING VIA 3D  
PRINTING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ľubomír Klimek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Lubomír Klimek</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vývoj procesních parametrů slitiny mědi pro 3D tisk tenkostěnných struktur

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování kovových materiálů pomocí laserového 3D tisku představuje vývoj procesních parametrů laseru a parametrů sekundárně ovlivňujících kvalitu a rychlost stavby. Proces spojování práškového materiálu pomocí selektivního tavení laseru je ovlivněn fyzikálními vlastnostmi materiálu, ale i tvarem vyráběného dílu. Nastavení výkonu laseru pro dosažení kvality musí být zohledněno dle aplikace a použití.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem diplomové práce je zpracování slitiny mědi technologií selektivního laserového tavení (SLM) pro aplikace v energetice pomocí experimentálních metod. Práce cílí na tenkostěnné a strukturované výměníky, chladiče.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat hlavní procesní parametry,
- návrh experimentů včetně mechanických zkoušek,
- realizace experimentů,
- analýza dat a vyhodnocení dosažených výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, laboratorní protokol.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, iv, 266 s. : obr., čb. fot. tabulky, grafy. ISBN 978-3-8383-1794-6.

DUDA, Thomas a L. Venkat RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. IFAC PapersOnLine [online]. Elsevier, 2016, 49(29), 103-110 [cit. 2017-10-27]. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111. ISSN 2405-8963.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



### ABSTRAKT

---

Predmetom tejto práce je spracovanie kovového materiálu metódou Selective Laser Melting. Hlavným cieľom je overiť a popísať vplyv jednotlivých procesných parametrov vstupujúcich do výrobného procesu pri spracovaní materiálu Cu7.2Ni1.8Si1Cr pomocou SLM. Tento materiál obsahuje 90 % medi. Teoretická časť práce popisuje doposiaľ spracované zliatiny s vysokým obsahom medi metódou Selective Laser Melting. Praktická časť sa následne zaoberá špecifikovaním hlavných procesných parametrov, ktoré sú v ďalšej časti riešenia práce optimalizované. Na základe získaných informácií boli vytvorené experimentálne telesá, ktoré budú vo viacerých krokoch testované a analyzované. Práca sa zameriava na tenkostenné vzorky, ktoré majú perspektívne využitie pri tvorbe vysokoúčinných tepelných výmenníkov. Hlavné výsledky, ktorými sa práca zaoberá, sú relatívna hustota a mechanické vlastnosti materiálu. Zároveň je kladený veľký dôraz na výslednú kvalitu povrchu.

### KĹÚČOVÉ SLOVÁ

---

Selective Laser Melting (SLM), zliatiny medi, meď, tenké steny, kvalita povrchu, Cu7.2Ni1.8Si1Cr

### ABSTRACT

---

In the work is used the processing of metallic material by the method of Selective Laser Melting. The main objective is to verify and describe the influence of the individual process parameters entering the production process when processing the alloy Cu7.2Ni1.8Si1Cr with SLM. This alloy contains 90 % copper. The first theoretical part of the thesis describes so far processed copper alloys with a high content of copper using the method of Selective Laser Melting. The practical part then deals with the specification of the main process parameters, which are optimized in the next part of the work solution. On the basis of the information obtained experimental bodies have been created, which will be tested and analyzed in several steps. The work focuses on thin-walled samples, which have a perspective use in the creation of high-efficiency heat exchangers. The main results that the work deals with are the relative density and mechanical properties of the material. Also, great emphasis is placed on the resulting surface quality.

### KEY WORDS

---

Selective Laser Melting (SLM), copper alloy, copper, thin-wall, surface quality, Cu7.2Ni1.8Si1Cr



**BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

---

KLIMEK, Ľ. Vývoj procesních parametrů slitiny mědi pro 3D tisk tenkostěnných struktur. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 87s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..



## POĎAKOVANIE

---

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu diplomovej práce, doc. Ing. Davidovi Palouškovi, Ph.D., za pomoc a cenné rady pri realizovaní tejto práce, ktoré ma usmerňovali k jej dokončeniu.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že túto diplomovú prácu *Vývoj procesních parametrů slitiny mědi pro 3D tisk tenkostěnných* struktur som vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho diplomovej práce doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D.. Zároveň prehlasujem, že som uviedol v zozname všetky použité literárne zdroje.

V Brne dňa 18.5. 2018

.....  
Bc. Lubomír Klimek



**OBSAH**

---

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>14</b>
2.1	Princíp SLM	14
2.2	Základné procesné parametre	14
2.2.1	Vplyv zmeny hrúbky nanesej vrstvy prášku	15
2.2.2	Vplyv zmeny skenovacej rýchlosti	15
2.2.3	Vplyv zmeny skenovacej stratégie	15
2.3	Procesy ovplyvňujúce výslednú kvalitu	16
2.3.1	Balling efekt	16
2.3.2	Schodový efekt	16
2.4	Spracované zliatiny medi	17
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>27</b>
3.1	Analýza problému	27
3.2	Cieľ diplomovej práce	27
3.2.1	Dílči ciele diplomovej práce	28
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METÓDY</b>	<b>29</b>
4.1	Použitý kovový prášok	29
4.2	Použitie zariadenie SLM 280 HL	30
4.3	Postup riešenia práce	31
4.4	Procesné parametre	32
4.5	Experimenty	33
4.5.1	Kolmé steny	33
4.5.2	Steny pod uhlom 45°	35
4.5.3	Vyhodnotenie porozity mikroskopom Olympus SZX7	35
4.5.4	Vyhodnotenie porozity pomocou počítačovej tomografie	35
4.5.5	Profilometer	36
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>37</b>
5.1	Test kolmých stien 1	37
5.1.1	Príprava a popis experimentu	37
5.1.2	Rozloženie vzoriek na platformách	37
5.1.3	Príprava a priebeh stavby	38
5.1.4	Analýza kolmých stien	39
5.1.5	Analýza posledných návarov	39
5.1.6	Vyhodnotenie šírky stien z metalografických výbrusov	41
5.1.7	Zhodnotenie šírky stien s kontinualitou návaru	44
5.1.8	Vyhodnotenie drsnosti	47
5.1.9	Zhrnutie výsledkov prvého experimentu	47
5.2	Test kolmých stien 2	48
5.2.1	Príprava a popis experimentu 2	48
5.2.2	Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme	48
5.2.3	Analýza samostatných kolmých stien	49
5.2.4	Analýza sady 20 tenkých kolmých stien hneď po stavbe	50
5.2.5	Analýza posledného návaru sady 20 kolmých stien	50
5.2.6	Analýza výbrusov sady 20 kolmých stien	51
5.2.7	Vyhodnotenie drnlosti sady 20 kolmých stien	53

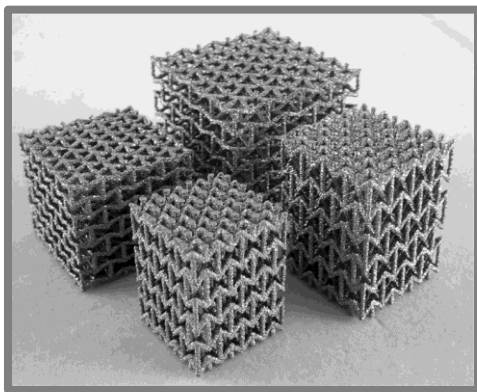
---

5.2.8	Zhrnutie výsledkov druhého experimentu	53
5.3	Test tenkých stien 3	54
5.3.1	Príprava a popis experimentu 3	54
5.3.2	Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme	54
5.3.3	Analýza samostatných kolmých stien	56
5.3.4	Analýza sád 10 stien hneď po stavbe	57
5.3.5	Analýza posledného návaru sady 10 stien experiment 3	57
5.3.6	Analýza výbrusov sady 10 kolmých stien	57
5.3.7	Vyhodnotenie parametru drsnosti sady 10 stien	60
5.3.8	Zhrnutie výsledkov tretieho experimentu	61
5.4	Test steny pod uhlom 45°	62
5.4.1	Príprava a popis experimentu	62
5.4.2	Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme	63
5.4.3	Analýza posledného návaru samostatných stien pod uhlom 45°	65
5.4.4	Analýza výbrusov samostatných stien pod uhlom 45°	65
5.4.5	Analýza drsnosti povrchu samostatných stien pod uhlom 45°	66
5.4.6	Analýza sád 6 stien pod uhlom 45°	67
5.4.7	Analýza výbrusov sád 6 stien pod uhlom 45°	67
5.4.8	Analýza parametru drsnosti sád 6 stien pod uhlom 45°	68
5.4.9	Test parametru downskin	69
5.4.10	Príprava a popis experimentu	69
5.4.11	Analýza výbrusu down skin	70
5.4.12	Analýza parametru drsnosti down skin	71
5.4.13	Zhrnutie steny pod uhlom 45°	72
5.5	Analýza pomocou $\mu$ CT	72
<b>6</b>	<b>DISKUSIA</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVER</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b>	<b>80</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>83</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>84</b>



## 1 ÚVOD

Technológia Selective Laser Melting je metóda výroby, ktorá ponúka nový pohľad na konštrukciu Obr.1. Jej princíp spočíva v stavbe výsledných dielcov po tenkých vrstvách. Pomocou laseru dochádza k nataveniu nanesej vrstvy kovového prášku, ktorý je spojený s predchádzajúcou vrstvou. Každou ďalšou vrstvou je pridávaný nový objem materiálu. Princíp je diametrálne rozdielny v porovnaní s konvenčnými metódami (frézovanie, sústruženie), ktoré využívajú na vytvorenie finálneho tvaru súčasti odoberanie prebytočného materiálu. V dôsledku veľkých teplotných gradientov vznikajúcich pri rýchlom tavení a chladnutí roztaveného prášku dochádza k vzniku vnútorného pnutia výslednej súčiastky, ako aj k vzniku viacerých defektov. Takýto jav je možné minimalizovať viacerými spôsobmi. Jednoduchší spôsob spočíva v tepelnom spracovaní finálneho výrobku, čo môže spôsobiť výrazné zmeny jeho mechanických vlastností. Ďalší spôsob je založený na optimalizovaní stavebného procesu a definovaní dôležitých procesných parametrov vstupujúcich do stavby, medzi ktoré patria predovšetkým výkon lasera, jeho skenovacia rýchlosť, hrúbka vrstvy kovového prášku a mnoho ďalších. Poprednou výhodou SLM je lepšie hospodárenie s materiálom vďaka veľkej tvarovej voľnosti. Tá dovoľuje tvorbu komplexnej geometrie, optimalizáciu výsledných tvarov a následné zníženie hmotnosti modelov. Práve pre spomínané výhody bola v počiatkoch metóda SLM používaná hlavne v leteckom priemysle.



Obr.1 Ukážka komplexnej geometrie (1)

Práca je venovaná materiálu  $\text{Cu}_{7.2}\text{Ni}_{1.8}\text{Si}_1\text{Cr}$  ktorý obsahuje približne 90% medi. Materiál sa vyznačuje vysokou tepelnou vodivosťou podobnou zlatu či striebriu a dobrými mechanickými vlastnosťami. Takýto materiál je predurčený na použitie v energetickom priemysle pri tvore tepelných výmenníkov či na formách určených na vstrekovanie plastov, ktoré vyžadujú konformné chladenie (12). Pri tvorbe tepelných výmenníkov je požadovaná veľká kontaktná plocha medzi samotným chladičom a chladiacim médiom. Lepšie výsledky prestupu tepla pri zachovaní rovnakých alebo menších rozmerov chladiča, je možné dosiahnuť vytvorením väčšieho počtu tenkostenných elementov. V dôsledku čoho je táto práca zameraná na definovanie a optimalizáciu stavebného procesu tenkostenných štruktúr. Veľký dôraz je kladený predovšetkým na kvalitu vzniknutých povrchov, porozitu a určenie mechanických vlastností.

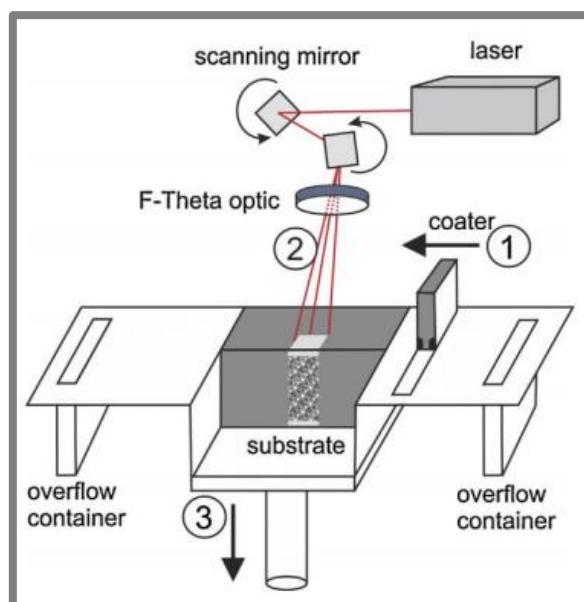
## 2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

---

### 2.1 Princíp SLM

---

Technológia SLM patrí do skupiny aditívnych technológií, ktoré pomocou kovového prášku a výkonného laseru vytvárajú výsledné objekty. Princíp (Obr.2) spočíva v nanosení tenkej vrstvy práškoveho materiálu nanášacím zariadením (1), zvyčajne niekoľko  $\mu\text{m}$ , na stavebnú platformu (3), ktorá býva vytvorená z podobného materiálu (2). Takto nanosená vrstva je následne natavená laserom (2) smerovaným optikou. Oblasť tavenia prášku je určená modelom, ktorý je v špeciálnom softwari rozložený do rezov podľa hrúbky nanášanej vrstvy. Po vypálení celej vrstvy stavebná platforma klesne o požadovanú hodnotu, naniesie sa nová vrstva prášku a cyklus sa opakuje, kým nie je vyrobený celý diel.



Obr.2 Schéma zariadenia SLM (2)

SLM technológia spája veľké množstvo fyzikálnych dejov, od absorpcie a rozptylu laserového žiarenia, prenosu tepla, fázovej transformácie, toku taveniny v tavnom bazéne až po chemické reakcie či vyparovanie materiálu.

### 2.2 Základné procesné parametre

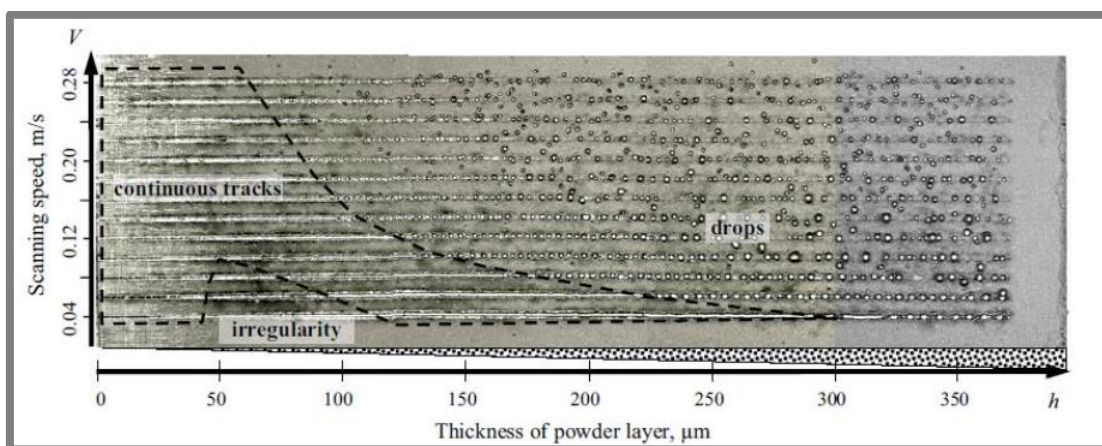
---

Výroba technológiou SLM je definovaná veľkým počtom parametrov, ktoré dokážu zásadne ovplyvniť kvalitu výsledného diela. Medzi hlavné parametre patrí rýchlosť lasera a jeho výkon, hrúbka nanášanej vrstvy prášku, skenovací strategía, inertná atmosféra či teplota stavebnej platformy. Vzájomná interakcia medzi jednotlivými parametrami nie je vždy jednoznačná a je potrebné ju overiť experimentálne.

### 2.2.1 Vplyv zmeny hrúbky nanesej vrstvy prášku

2.2.1

Práca (3) sa zaoberá vplyvom hrúbky vrstvy naneseného prášku SS316L na stavebnú platformu. Test pozostával z líniových návaroch vytvorených na platforme, ktorá bola uložená pod uhlom. Takto vznikol plynulý prechod od najtenšej po hrubšiu vrstvu. Jednotlivé návary boli skenované rovnakým výkonom ale rozdielnymi rýchlosťami. Na Obr.3 je zobrazený pohľad na platformu s návarmi, kde je možné sledovať tri oblasti. Prvá oblasť hrubej vrstvy prášku obsahujúca tzv. balling efekt, ktorý spôsobil rozpadnutie návaru na veľký počet guľčiek. Druhá oblasť s výskytom nekontinuality v dôsledku veľkého pretavenia malej vrstvy prášku. Tretia oblasť spojitých návarov, ktorá nevykazuje takmer žiadne defekty.



Obr.3 Jednotlivé návary vytvorené výkonom 50 W a meniacou sa šírkou vrstvy (3)

### 2.2.2 Vplyv zmeny skenovacej rýchlosti

2.2.2

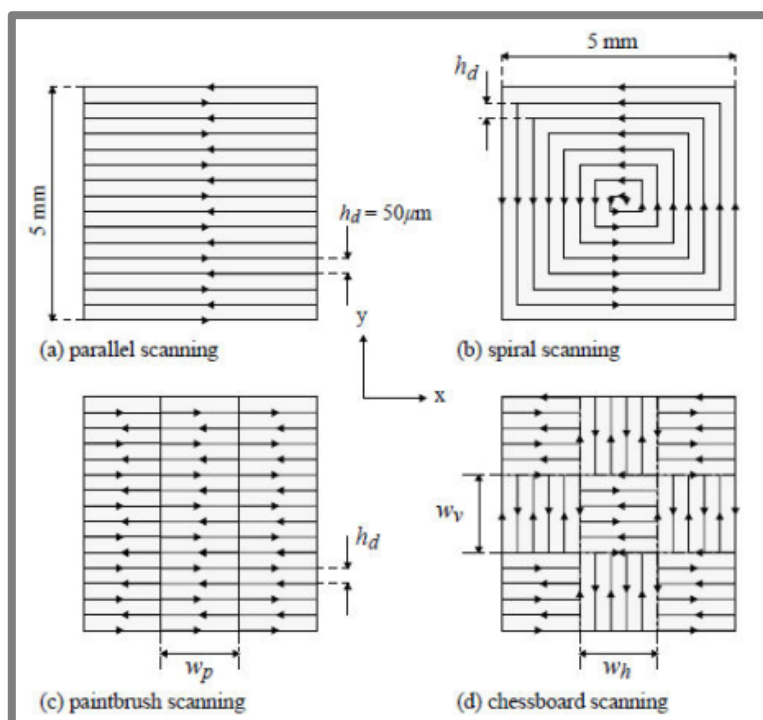
Pri použití SLM je kladený dôraz na ekonomické náklady výroby. Tie je možné znížiť použitím vysokej skenovacej rýchlosti, kedy s jej zvyšovaním klesá výrobný čas. Použitie vysokých rýchlostí je limitované stabilitou tavného procesu. Ich zvyšovaním dochádza k zmenšovaniu dodávanej hustoty energie do návaru. V dôsledku toho môže nastať zlé natavenie prášku a spojenie s predchádzajúcou vrstvou. Rovnako dochádza k rýchlemu chladnutiu taveniny a vznik jemnej štruktúry, ktorá je spojená s výslednou tvrdosťou a mechanickými vlastnosťami materiálu.

### 2.2.3 Vplyv zmeny skenovacej stratégie

2.2.3

Proces výroby SLM je spojený s veľkými gradientmi teplôt, ktoré sa vyskytujú v priebehu stavby diela (4). Vrchná oblasť je vystavovaná účinkom lasera a zohrievaná až na teplotu tavenia použitého materiálu, zatiaľ čo zo spodnej strany je diel'lochládovaný odvodom tepla do konštrukcie výrobného zariadenia SLM. V dôsledku veľkých teplotných rozdiel'ov dochádza k vnútornému napätiu a môže nastať deformácia výsledných rozmerov či oddelenie vyrábaného diela od základnej platformy. Tento jav je možné vo väčšej miere odstrániť dodatočným tepelným spracovaním. Druhá možnosť odstránenia tohto javu je použiť komplexnejšiu skenovaciu stratégiu, ktorá dovoľuje počas stavby v dieli rovnomernejšie rozloženie tepelného namáhania. Na Obr.4 sú zobrazené bežne používané stratégie. *parallel scannig* je najjednoduchšia používaná stratégia, ktorá pozostáva z paralelných skenovacích dráh a vykazuje zvyčajne najvyššie teplotné namáhanie diela. Druhá stratégia *spiral scanning* dosahuje lepšie rozloženie teplotného gradientu, no obsahuje

miesta (rohy), kde dochádza k lokálnemu navýšeniu teploty. Paintbrush scanning je stratégia podobná parallel scanning s tým rozdielom, že celá oblasť je rozdelená na viaceré časti, čo má za následok lepšie rozloženie teploty. Posledná stratégia chessboard scanning pozostáva z malých ostrovčekov, ktoré sú skenované metódou parallel scanning, rozložených rovnomerne po celej ploche diela. Ich skenovanie je rozdelené postupne po objeme, čo má za následok opäť lepšie rozloženie a ochladenie diela. Posledné dve stratégie sú citlivé na voľbu rozmerov rozdelených častí, ktoré treba vopred presne definovať.



Obr.4 Používané skenovacie stratégie (4)

## 2.3 Procesy ovplyvňujúce výslednú kvalitu

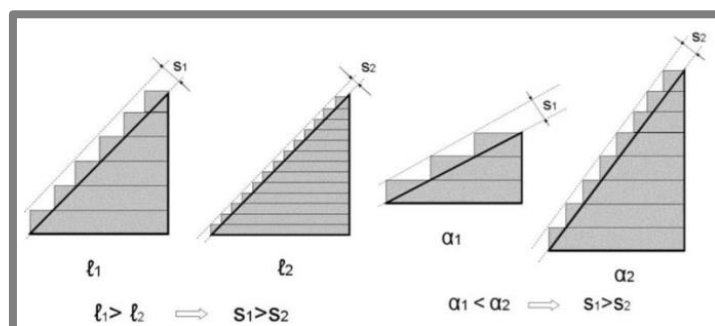
### 2.3.1 Balling efekt

Balling efekt vzniká v dôsledku povrchového napätia roztaveného kovu, kedy sa materiál snaží dosiahnuť optimálny pomer medzi povrchom a objemom (5). Tento jav má za následok narušenie homogenity toku materiálu a dochádza k vzniku oddelených guľičiek. Dôsledkom toho je výskyt porozity a nehomogenita vytvorených vrstiev s následným negatívnym vplyvom na mechanické vlastnosti a kvalitu povrchu. Medzi hlavné faktory vplyvajúce na vznik balling efektu sú plocha a objem tavného bazénika, čas jeho chladnutia a distribúcia prášku (6).

### 2.3.2 Schodový efekt

Veľkou nevýhodou všeobecne aditívnych technológií je takzvaný schodový efekt (Obr.5). K výrobe súčastí dochádza postupným pridávaním nových vrstiev materiálu zvyčajne na hornej ploche. Pri tvorbe povrchov pod určitým uhlom nastáva k posuvu vrchnej vrstvy voči spodnej, čím je dosiahnutá zmena uhlu. Najväčší vplyv na výslednú kvalitu má výška nanášanej vrstvy. Čím bude vrstva užšia, tým sa bude

tento efekt menej prejavovať. Následne užšia vrstva spôsobuje značné predĺženie výroby, a tým pádom finančných nárokov.



Obr.5 Ukážka schodového efektu (7)

## 2.4 Spracované zliatiny medi

2.4

Firma Citim sa zaoberá spracovávaním zliatiny UNS C 18000 (CuNi2SiCr) metódou SLM (8). Daná zliatina obsahuje 96,4% Cu, 2,4% N, 0,6% Si, 0,45% Cr. Po dokončení stavby danou firmou dosahuje materiál medzu pevnosti  $251 \pm 10$  MPa, medzu skľu  $192 \pm 10$  MPa a modul pružnosti  $89 \pm 5$  GPa. Po následnom precipitačnom vytvrdnutí medza pevnosti dosahuje hodnotu až  $595 \pm 10$  MPa, medza skľu  $508 \pm 10$  MPa a modul pružnosti  $97 \pm 5$  GPa. Materiál vyrobený konvenčnými metódami má podobné mechanické vlastnosti, ktorý dosahuje medzu pevnosti 650 MPa a medzu skľu 520 MPa (11). Samotné procesné parametre a ďalšie nastavenia sú firemným tajomstvom.

O prvý pokus zameraný na spracovanie zliatiny medi sa postarali W. Wu, Y. Yang a Y. Huang v roku 2006, kedy ich snaha smerovala ku zliatine Cu8Sn6.5P1Ni (9). Použitý kovový prášok pozostával z častíc s veľkosťou pod  $75 \mu\text{m}$  a bol spracovávaný na zariadení DiMetal-240, ktorý používal laserový lúč s priemerom  $100 \mu\text{m}$  a hrúbku nanášanej vrstvy prášku  $320 \mu\text{m}$ . Každá vrstva prášku bola skenovaná dvakrát, kedy pri prvom skenovaní bola použitá hatch distance  $70 \mu\text{m}$  a skenovacia rýchlosť  $500 \text{ mm/s}$ , pri druhom skenovaní  $30 \mu\text{m}$  a  $1000 \text{ mm/s}$ . Výkon lasera pri stavbe bol  $90 \text{ W}$ . Samotná stavba začínala vytvorením prvej vrstvy s výkonom lasera  $P = 120 \text{ W}$  a skenovacou rýchlosťou  $200 \text{ mm/s}$ . Výsledná relatívna hustota materiálu dosahovala hodnotu 95% (meraná pomocou Archimedovej metódy).

D.Q. Zhang, Z. H. Liu, C.K. Chua sa zaoberali spracovaním zliatiny medi UNS C18400 (Obr.6) (10). Použitý kovový prášok bol vytvorený plynovou atomizáciou (gas atomization) s priemernou veľkosťou častíc  $12 \mu\text{m}$ . Pri pokuse bolo použité zariadenie SLM 250<sup>HL</sup> nemeckej firmy SLM Solution GmbH, ktoré bolo modifikované na použitie dvoch laserov. Prvé usporiadanie používalo laser s Gaussovou distribúciou lúča s výkonom  $400 \text{ W}$  a priemerom  $80 \mu\text{m}$  (Obr.7), druhé laser s výkonom  $1 \text{ KW}$  a priemerom  $730 \mu\text{m}$  (Obr.8). Hrúbka nanášanej vrstvy prášku sa rovnala  $50 \mu\text{m}$  a boli vytvorené testovacie kocky  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$  na určenie hustoty. Hatch distance bola volená pre prvý laser od  $50$  do  $150 \mu\text{m}$  a pre druhý od  $100$  do  $200 \mu\text{m}$ . Zároveň bola použitá vyhrievaná platforma na teplotu  $100^\circ\text{C}$  za cieľom zníženia teplotného gradientu v dôsledku vysokej tepelnej vodivosti medi. Ako skenovacia metóda bola použitá metóda chess board (Island scanning strategy). Po stavbe boli



viditeľné tri oblasti. Prvá oblasť vykazovala nesúvislé roztavenie prášku, čo má za následok zlé prepojenie jednotlivých navarených vrstiev v dôsledku nedostatočnej energie. Táto oblasť sa objavovala pri použití lasera s konštantnou distribúciou lúča pri výkone 200 W a rýchlostiach vyšších ako 600 mm/s. Druhá oblasť spojitých návarov a vysokej relatívnej hustoty sa nachádzala pri použití lasera s konštantnou distribúciou lúča pri výkonoch od 400 do 1000 W a rýchlostiach od 600 do 1000 mm/s. V prípade Gaussovej distribúcie lúča sa táto oblasť nachádzala pri výkonoch lasera od 200 do 400 W a rýchlostiach nad 100 mm/s. Tretia oblasť pozostávala z pretavených návarov, ktoré boli spôsobené vysokou energiou. Výsledkom samotného experimentu bolo dokázanie, že výsledná relatívna hustota je významne závislá na voľbe vhodných procesných parametrov. Pri použití lasera s kontinuálnou distribúciou s výkonom 800 W a skenovacou rýchlosťou 600 mm/s bola dosiahnutá hustota 96,74%. Pri použití lúča s Gaussovou distribúciou boli dosiahnuté menej uspokojivé výsledky. Relatívna hustota dosahovala hodnotu 92,99%, čo autori pripisujú veľkej teplotnej vodivosti zliatiny medi. V experimente boli testované aj tenkostenné vzorky. Za týmto cieľom bola vytvorená geometria, ktorá obsahovala steny rozličných hrúbok, od 0,4 do 3 mm. Vytvorené tenkostenné prvky vykazovali dobrú kvalitu, ktoré by mohli byť po ďalšej optimalizácii použiteľné napríklad vo výmenníkoch tepla (Obr.9). V tejto práci neboli skúmané mechanické vlastnosti materiálu vytvoreného metódou SLM.

Cu	Cr	Si	Zr	Fe	Others
98.37–98.12	0.5–1.2	<0.1	0.03–0.3	<0.08	<0.2

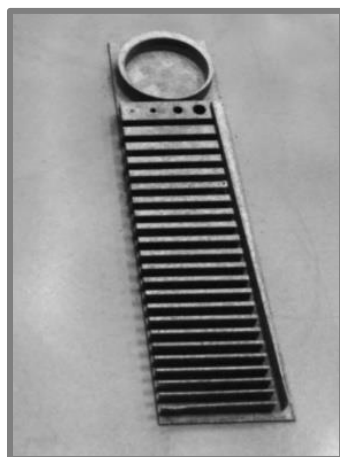
Obr.6 Chemické zloženie UNS C18400 (10)

Scan speed (mm/s)	Laser power(W)		
	200	300	400
100	S10	S11	S12
600	S20	S21	S22
1000	S30	S31	S32

Obr.7 Použitá skenovacia rýchlosť a výkon lasera pre lúč s Gaussovou distribúciou (10)

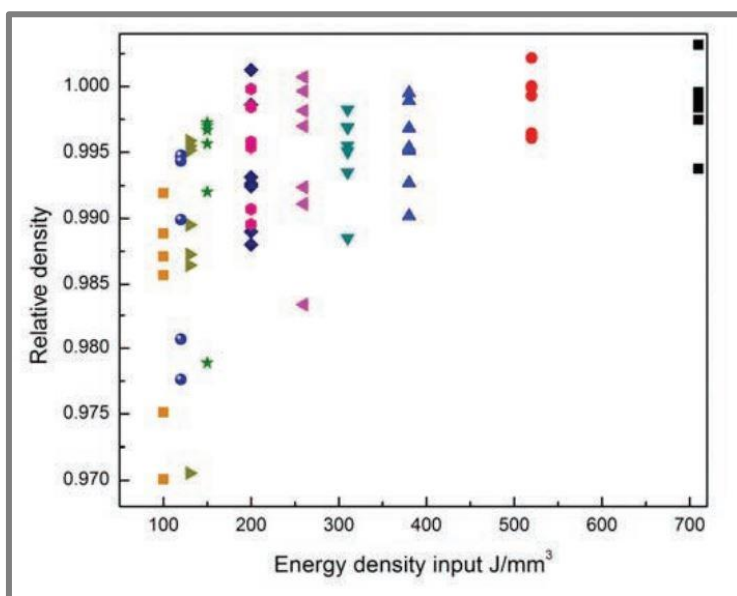
Scan speed (mm/s)	Laser power (W)				
	200	400	600	800	1000
100	S13	S14	S15	S16	S17
600	S23	S24	S25	S26	S27
1000	S33	S34	S35	S36	S37

Obr.8 Použitá skenovacia rýchlosť a výkon lasera pre spojitý lúč (10)



Obr.9 Testovacia vzorka tenkých stien (10)

D. Q. Zhang, Z. H. Liu, S. Li, et al. skúmali spracovanie zliatiny Hovadur K220, ktorej chemické zloženie pozostáva z 2,4% Ni, 0,7% Si, 0,4 Cr a 96,5% Cu (11). V práci používali zariadenie SLM 250<sup>HL</sup> vybavené 400 W vláknovým laserom (priemer lúča 80  $\mu\text{m}$ ). Kovový prášok bol vytvorený plynovou atomizáciou (gas atomization), ktorého častice merali 20-63  $\mu\text{m}$ . Výsledná relatívna hustota bola meraná Archimedovou metódou. Najlepšie výsledky relatívnej hustoty dosiahli pri výkone lasera 375 W, hatch distance 90  $\mu\text{m}$ , skenovacej rýchlosti 530 mm/s a hrúbky nanášanej vrstvy 30  $\mu\text{m}$ . Výsledná relatívna hustota materiálu dosahovala hodnotu 99,9% pri hustote objemovej energie 200  $\text{J}/\text{mm}^3$  (Obr.10). Ďalšie dobré výsledky relatívnej hustoty bližšie sa hodnote 98,8%, boli dosahované pri hustote objemovej energie nad 260  $\text{J}/\text{mm}^3$ .



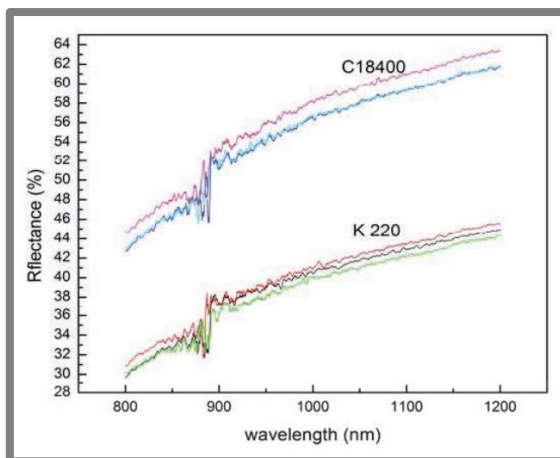
Obr.10 Závislosť relatívnej hustoty na hustote objemovej energie (11)

Práca sa taktiež zaoberala tepelným spracovaním zliatiny, ktoré pozostávalo z dvoch etáp. Prvá spočívala v spracovaní po dobu jednej hodiny pri teplote 900°C (v dusíkovej atmosfére), po ktorej nasledovalo kalenie a starnutie 25 hodín pri teplote 450°C. Počas tohto času dochádzalo k precipitácii bunkových dendritov (zoskupenie malých

kryštálov)  $\text{Ni}_2\text{Si}$  a  $\text{Ni}_3\text{Si}$  s veľkosťou  $1\text{ }\mu\text{m}$ . Bezprostredne po stavbe materiál dosahoval tvrdosť  $81,56 \pm 3,6\text{ HV}$ . Tepelnou úpravou zliatina dosiahla tvrdosť  $184,3 \pm 5,7\text{ HV}$ . Autori sa počas experimentu čiastočne venovali odrazivosti samotného kovového prášku. V porovnaní so zliatinou UNS C18400, ktorou sa zaoberali v predošlej práci (10), dosahuje K220 len polovičnú hodnotu odrazivosti, čomu autori pripisujú lepšie výsledky (Obr.12). Práca sa nezaobrá d'alšími mechanickými vlastnosťami.



Obr.11 SLM vzorky vytvorené z kovového prášku K220 (11)

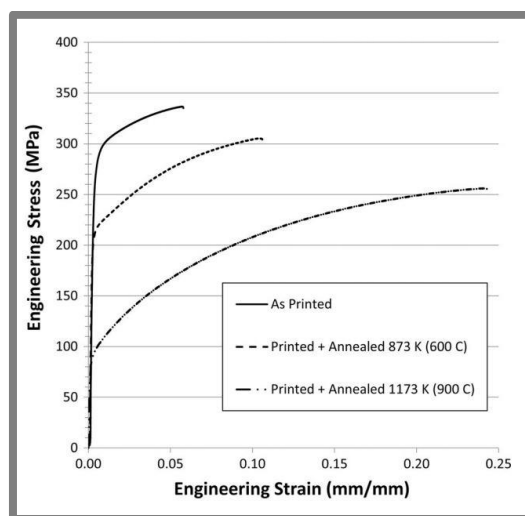


Obr.12 Závislosť odrazivosti kovového prášku C18400 a K220 na vlnovej dĺžke svetla (11)

Ventura, A.P., Wade, C.A., Pawlikowski, G. et al. sa zaoberali vo svojej práci zliatinou Cu-Sn (4.3% Sn, 95,7% Cu), kedy ich snaha smerovala v prvej časti práce k optimalizácii procesných parametrov, za cieľom dosiahnuť najväčšiu možnú relatívnu hustotu objemových vzoriek (12). Kovový prášok bol vytvorený plynovou atomizáciou (gas atomization) s maximálnym rozmerom častíc  $63\text{ }\mu\text{m}$ . Tento prášok bol následne spracovávaný na zariadení EOSINT M280 osadený vláknovým laserom (Yb-fiber) s maximálnym výkonom  $200\text{ W}$ . Najlepšie výsledky boli dosiahnuté s výkonom lasera  $195\text{ W}$ , skenovacou rýchlosťou  $390\text{ mm/s}$ , priemerom lúča  $190\text{ }\mu\text{m}$ , hatch distance  $100\text{ }\mu\text{m}$  a hrúbkou nanášanej vrstvy  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Pri daných procesných parametroch bola dosiahnutá relatívna hustota 97%, ktorá bola meraná Archimedovou metódou. V druhej časti experimentu sa autori zamerali na vplyv tepelného



spracovania použitej zliatiny, konkrétne po dobu jednej hodiny pri teplote 600 °C a 900 °C. Prvá hodnota teploty bola zvolená pre jej bežné používanie pri žíhaní bronzových zliatin. Druhá, vyššia teplota bola zvolená za cieľom výraznejšej zmeny mikroštruktúry. Na Obr.13 sú zobrazené závislosti napätia na relatívnej deformácii. Najväčšia hodnota medze sklzu bolo dosiahnutá na vzorkách hneď po tlači (as-printed), kedy dosiahla hodnotu 274 MPa. Ďalšie tepelné spracovanie pri teplote 600 alebo 900 stupňov, malo za následok jej zníženie. Tepelné spracovanie pri teplote 600 °C viedlo k zníženiu medze sklzu na 208 MPa a pri teplote 900 °C sa medza sklzu znížila až na 102 MPa (Obr.14). V práci sa autori okrem iného zaoberali zmenou štruktúry pri tepelnom spracovaní.

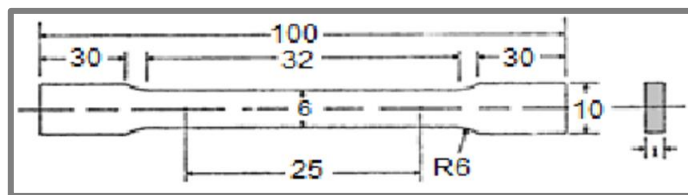


Obr.13 Závislosť napätia na relatívnej deformácii vzorku (16)

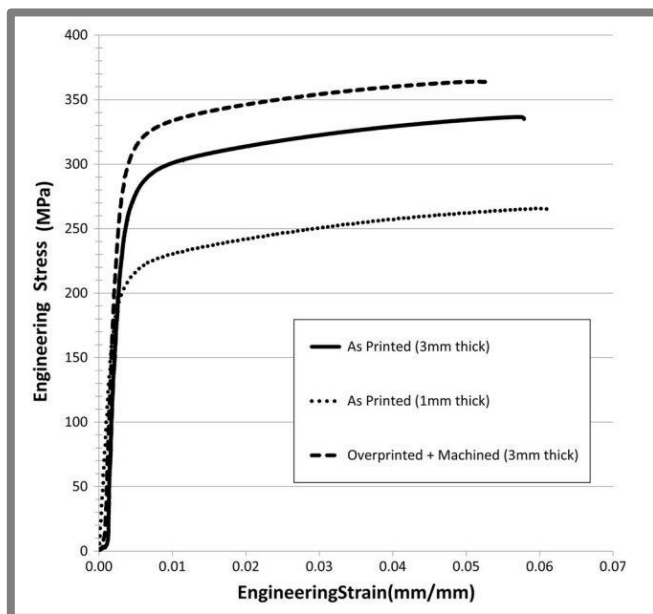
Sample	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation at Failure (Pct)	Conductivity (Pct IACS)
As printed	274	334	5.6	24.1
Printed + annealed 873 K (600 °C)	208	309	12.4	21.2
Printed + annealed 1173 K (900 °C)	102	267	26.1	21.0

Obr.14 Dosiahnuté mechanické vlastnosti hneď po tlači a po tepelnom spracovaní (12)

Autori sa v práci zamerali aj na vplyv kvality vytvoreného povrchu, kde porovnávali vzorky s hrúbkou 3 mm bez dodatočného opracovania (as-printed) (Obr.15) a vzorky, ktorých finálne rozmery boli vytvorené opracovaním prídavkov konvenčnými metódami. Do porovnania pridali aj tenkostennú vzorku, ktorej hrúbka bola 1 mm. Na Obr.16 je zobrazená závislosť napätia na relatívnom predĺžení. Z grafu je zrejmé, že kvalita povrchu má značný vplyv na mechanické vlastnosti, čo pri ďalšom vývoji bude potrebné zohľadniť. V prípade as-printed vzorky sa medza sklzu pohybuje okolo 274 MPa. Vzorka, ktorá bola dodatočne obrobená na finálne rozmery vykazuje vyššiu medzu sklzu 301 MPa. Autori tento jav pripisujú zlepšeniu kvality povrchu po obrobení, čo má za následok menší počet ostrých hrán, ktoré sa nachádzajú na povrchu medzi návarmi, ktoré slúžia ako iniciátori trhlín. Samotná práca sa nezaoberala ďalším ladením kvality povrchu.

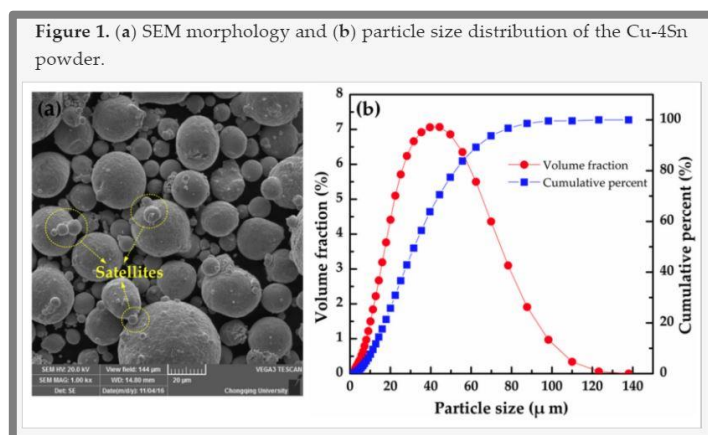


Obr.15 Rozmery testovacích vzoriek (ASTM-E8) (12)



Obr.16 Závislosť napätia na relatívnom predĺžení (12)

Autori ďalšej práce sa zaoberali kovový práškom Cu-4Sn, ktorý bol vytvorený plynovou atomizáciou (gas atomization) spoločnosťou Wuxi SNDVARY (Obr.17), ktorého chemické zloženie pozostávalo z 3,95 Sn, 0,2 ďalších nečistôt a zvyšku medi (13). Prášok bol tvorený guľovitými časticami, ktorých distribúcia je vynesená v obr. 12. Pri práci bolo používané zariadenie Eosint M280 vybavené vláknovým laserom s maximálny výkonom 200 W (ytterbium fiber laser YLR-20), ktorý vytvára lúč s Gaussovým profilom.

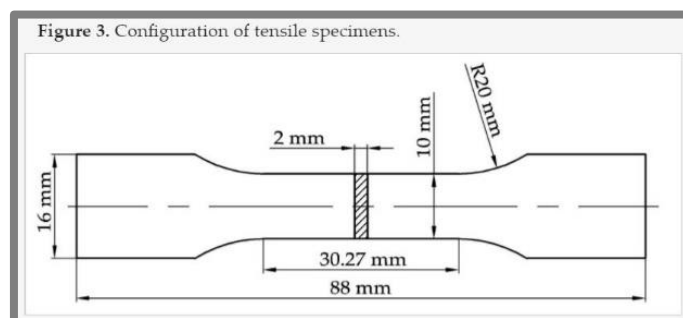


Obr.17 Tvar a distribúcia prášku (13)

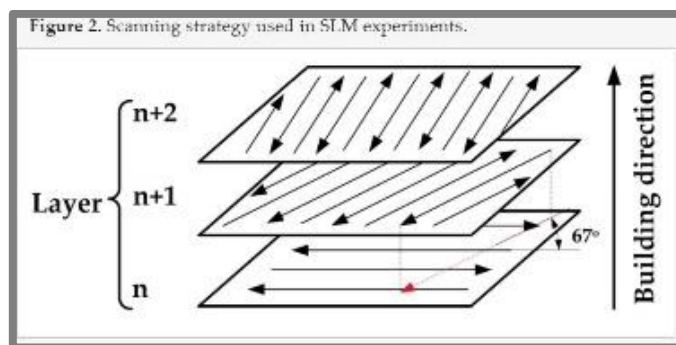
Medzi prvé experimenty patrili single tracky, ktorých cieľom bolo nájsť vhodné procesné parametre pre ďalší postup. Nastavenie zariadenia sa líšilo pre jednotlivé single tracky. Dodávaná lineárna hustota energie (linear energy density-LED) do zvaru sa menila od 100–1000 J/m, výkon lasera od 50–195 W po 25 W krokoch a skenovacia rýchlosť od 50–1950 mm/s. Vrstva nanášaného prášku bola 20  $\mu\text{m}$ , priemer lúča 100  $\mu\text{m}$  a teplota platformy 80 °C. Použité procesné parametre sú prehľadne zobrazené na Obr.18. Na základe výsledkov zo single track vzoriek bol vytvorený druhý experiment, kocky s rozmermi 5x5x5 mm, ktoré ďalej vymedzili použiteľné procesné parametre. V ďalšej časti už boli vytvorené vzorky na určenie mechanických vlastností (Obr.19), kde bola použitá skenovacia stratégia cross-hatching, pričom skenovacie vektory každej ďalšej vrstvy boli pootočené o 67°. Táto stratégia sa ukázala ako najlepšia voľba vďaka vyhovujúcej kvalite povrchu a minimalizácii ďalších defektov (oObr.20). Relatívna hustota bola meraná Archimedovou metódou. Najlepšie výsledky autori dosiahli pri procesných parametroch: výkon lasera 195 W, skenovacia rýchlosť 50 mm/s a hatch distance 60  $\mu\text{m}$ , s dosiahnutou hustotou 93,68 %. Nízkú hustotu autori pripisujú predovšetkým nízkej energii lasera, v dôsledku čoho nevznikalo dostatočné množstvo kvapalnej fázy pri návaroch. Pevnosť v ťahu takto pripraveného materiálu dosiahla hodnotu 316-320 MPa, ktorá je výrazne nižšia v porovnaní s bežne vyrábaným materiálom, > 410 MPa. Nízkú hodnotu pevnosti autori pripisujú nízkej relatívnej hustote, a tým pádom veľkému počtu defektov v celom objeme.

Parameters	Value	Increment
LED	100–1000 J/m	100 J/m
LP	50–195 W	25 W
SS	0.05–1.95 m/s	-
Layer thickness	20 $\mu\text{m}$	-
Preheating temperature	80 °C	-
Substrate material	Die Steel (MS1)	-
Atmosphere	Argon (Oxygen level < 0.1%)	-

Obr.18 Procesné parametre použité pri single track testoch (13)



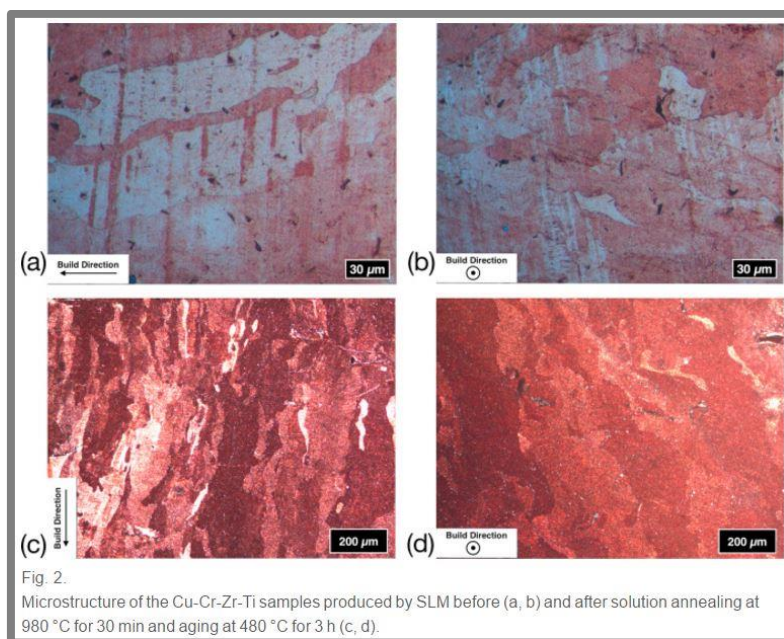
Obr.19 Rozmery trhacích vzoriek (13)



Obr.20 Použitá skenovacia stratégia (13)

A. Popovich, V. Sufiiarov, I. Polozov, E. Borisov, D. Masaylo, A. Orlov sa v práci zaoberali spracovaním zliatiny Cu-Cr-Zr-Ti, ktorého chemické zloženie pozostávalo z 0,5-0,7% Cr, 0,02-0,05% Zr, 0,02-0,05% Ti a zvyšku Cu (99,46-99,2%) (14). Prímes malého množstva Zr a Ti majú za následok zlepšenie teplotnej vodivosti samotnej zliatiny Cu-Cr. Kovový prášok bol vytvorený plazmovou atomizáciou s rozmermi častíc 16-79  $\mu\text{m}$ . V práci bolo použité zariadenie SLM 280HL vybavené 400 W laserom. Pri tisku bola v komore ochranná atmosféra argónu. Najlepšie výsledky relatívnej hustoty boli dosiahnuté pri použití parametrov: výkon laseru 400 W, skenovacia rýchlosť 400 mm/s, hatch distance 100  $\mu\text{m}$  a hrúbka nanášanej vrstvy prášku 50  $\mu\text{m}$ . Relatívna hustota dosiahla hodnotu 97,9% a bola meraná Archimedovou metódou. Autori sa v práci zaoberali aj mikroštruktúrou a tepelným spracovaním, ktoré pozostávalo zo žihania po dobu 30 minút pri teplote 980  $^{\circ}\text{C}$  a nasledovného starnutia tri hodiny pri teplote 480  $^{\circ}\text{C}$ , kedy chladnutie prebiehalo na vzduchu. Skúšky mechanických vlastností boli realizované na vzorkách, ktorých povrch bol obrobený na finálne rozmery konvenčnými metódami. Použitá zliatina je vhodná na použitie aj pri vyšších teplotách, preto boli jej mechanické vlastnosti skúmané aj pri zvýšenej teplote, a to 20, 600 a 800 $^{\circ}\text{C}$  (Obr.22).

Analýza mikroštruktúry odhalila pozdĺžne zrná, ktoré sú orientované v smere stavby, s rozmermi 30–250  $\mu\text{m}$ . Skôr spomenuté tepelné spracovanie malo za následok zväčšenie jednotlivých zrn, pričom ich orientácia bola zachovaná. Rozmery zrn sa zmenili na 40–450  $\mu\text{m}$ . (Obr.21). Skúšky mechanických vlastností dokázali medzu pevnosti materiálu 195-211 MPa a predĺženie 11-16% pri izbovej teplote. Tepelné spracovanie materiálu výrazne znížilo mechanické vlastnosti. Taktiež bol dokázaný vplyv smeru stavby na mechanické vlastnosti, kedy stavba orientovaná kolmo na smer skúšky dosahovala horšie vlastnosti v porovnaní so stavbou, ktorá bola s ňou orientovaná paralelne. V porovnaní s materiálom valcovaným za tepla je medza pevnosti približne o 20-25% menšia.



Obr.21 Mikroštruktúra Cu-Cr-Zr-Ti (14)

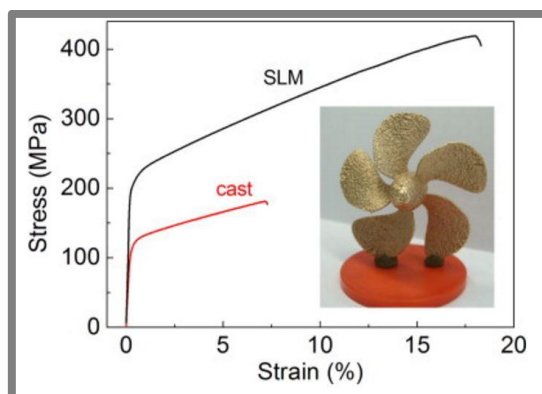
Table 1.  
Mechanical properties of the SLM Cu-Cr-Zr-Ti samples after heat treatment.

Specimen type	UTS, MPa			Elongation at break, %		
	20 °C	600 °C	800 °C	20 °C	600 °C	800 °C
Perpendicular to build direction	195.1–	69.5–	31.3–	10.8–	4.4–	6.3–
	198.0	86.2	33.3	11.7	5.7	12.0
Parallel to build direction	210.0–	82.2–	41.2–	13.1–	4.2–	7.8–
	211.0	82.3	46.6	15.8	7.7	12.1
Hot-rolled + heat treated [9]	249	107	–	40	6	–

Obr.22 Mechanické vlastnosti Cu-Cr-Zr-Ti (14)

Autori tejto práce sa zaoberali spracovaním zliatiny Cu-10Sn (15). Kovový prášok bol vytvorený plynovou atomizáciou (gas atomization) s rozmerom častíc  $85 \pm 15 \mu\text{m}$  a spracovaný zariadením SLM 250HL, ktoré je vybavené vláknovým laserom (YB-YAG laser). Optimalizovaním procesných parametrov bola dosiahnutá relatívna hustota 99,7%, ktorá bola meraná Archimedovou metódou. Použité procesné parametre: výkon lasera 271 W, skenovacia rýchlosť 210 mm/s, hatch distance 90  $\mu\text{m}$ , hrúbka nanášanej vrstvy 90  $\mu\text{m}$ . V komore sa nachádzala inertná atmosféra argónu. Autori v práci vytvorili vzorky odlieváním, na ktorých následne porovnávali mechanické vlastnosti so vzorkami vytvorenými metódou SLM. Práca sa zaoberala aj makroštruktúrou zliatiny, ktorá bola veľmi jemná. Autori tento jav pripisujú dobrej tepelnej vodivosti zliatiny, ktorá má za následok rýchle schladnutie návarov. Dosiahnutá medza pevnosti pre SLM vzorky dosahovala hodnoty 220-420 MPa, ktorá je výrazne vyššia v porovnaní s odlievanými vzorkami, ktoré dosahovali hodnotu len 120-180 MPa (Obr.23). Taktiež ťažnosť SLM materiálu sa zvýšila zo 7 na 17%.





Obr.23 Priebeh napätia SLM vs odlievateľných vzoriek (15)

Lykov P.A., Safonov E.V. and Akhmedjanov A.M. sa v práci zaoberali spracovaním kovového prášku čistej medi (16). Pri experimentoch používali kovový prášok vytvorený plynovou atomizáciou (gas atomization), kde priemerný rozmer častíc bol  $32,52 \pm 19,86 \mu\text{m}$ . Počas stavby bola použitá inertná atmosféra argónu. Použité bolo zariadenie SINTERSTATION® Pro DM125 SLM Systém s CO<sub>2</sub> laserom s výkonom 200 W a priemerom lúča 35  $\mu\text{m}$ . Samotný experiment pozostával z vytvorenia 5 kociek 10x10x5 mm, pri ktorých sa líšili jednotlivé procesné parametre (Obr.24)(Obr.25). Hatch distance mala nemennú hodnotu 120  $\mu\text{m}$  a hrúbka nanášanej vrstvy prášku bola 50  $\mu\text{m}$ . Výsledná relatívna hustota bola určená Archimedovou metódou. Najlepšie hodnoty relatívnej hustoty, 88,1 %, boli dosiahnuté pre vzorky s označením N1, kedy bola do návaru dodaná najväčšia objemová energia. Pre rovnaké vzorky bola vyhodnotená aj medza pevnosti, ktorá dosahovala hodnotu 149 MPa. Táto hodnota je nižšia v porovnaní s čistou meďou spracovávanou bežnými metódami, ktorá dosahuje medzu pevnosti 221-379 MPa. Autori v závere práce pripomínajú, že cieľom práce nebolo nájsť najlepšie procesné parametre, ktorými by bolo možné dosiahnuť čo najväčšiu relatívnu hustotu. Zámerom bol prvotný nástrel parametrov, ktoré plánujú autori v budúcnosti optimalizovať.

N of specimen	Laser power, [W]	Scanning speed, [mm/s]	Point distance, [ $\mu\text{m}$ ]	Exposure time, [ $\mu\text{s}$ ]
N1	200	100	50	400
N2	200	150	50	400
N3	200	150	100	400
N4	200	100	50	400
	100	200	200	200
N5	200	100	50	400
	150	300	300	100

Obr.24 Použité procesné parametre (16)



Obr.25 Cube vzorky postavené z medi (10)

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3

---

#### 3.1 Analýza problému

3.1

---

Aditívna výroba pomocou technológie SLM vyžaduje multidisciplinárny prístup. V rámci procesu 3D tisku dochádza k rade fyzikálnych dejov spôsobených dodávaním intenzívneho lokálneho tepla pomocou lasera. To, akým spôsobom tento proces prebieha zásadne ovplyvňuje vlastnosti vytvoreného materiálu, jeho mechanické vlastnosti a v poslednej rade výsledný tvar a kvalitu vyrobeného diela. Do tohto procesu vstupuje veľké množstvo procesných parametrov. Ich správna kombinácia a použitie je alfa a omega výroby pomocou technológie SLM. Tieto parametre je možné rozdeliť do viacerých skupín. Najviac variabilné sú parametre lasera, jeho výkon, rýchlosť skenovania, focus a mnoho ďalších. Ďalšia skupina sú parametre použitého materiálu. Zásadnú úlohu zohráva jeho tepelná vodivosť a schopnosť absorbovať laserové žiarenie. Materiály s vysokou tepelnou vodivosťou vyžadujú pri spracovaní použitie výkonnejších laserov. Hlavným dôvodom je veľký odvod tepla z miesta tavenia do stavebnej platformy a okolitého prášku. Na zníženie negatívneho dopadu teplotného gradientu je používaná vyhrievaná stavebná platforma, ktorá spadá do ďalšej kategórie procesných parametrov (10, 13). Dôsledkom teplotného gradientu môže nastať zdeformovanie výsledného diela, prípadne jeho oddelenie počas stavby od základnej platformy ako aj vznik vnútorného pnutia po stavbe.

Výrobca prášku a 3D tlačiarňi dodávajú so zakúpeným materiálom určite zoskupenie overených procesných parametrov predovšetkým pre objemové diely. V tejto časti sa objavuje hlavná problematika tejto práce. Vyprofilované procesné parametre určené na stavbu objemových vzoriek nie je vždy možné použiť pri tvorbe tenkostenných dielov. Pri tenkostennej aplikácii nastáva diametrálne rozdielny proces výroby spôsobený rozdielnou geometriou. Táto zmena výrazne ovplyvňuje proces tavenia a deje s ním spojené. Zásadný obrat nastáva pri distribúcií tepla tenkými stenami, ako aj zredukovaná možnosť použitia skenovacích stratégií. Pre tenké steny stavané z použitej zliatiny medi nie sú známe procesné parametre, a nikde nie je popísaná metodika ich výroby a postup odladenia tavného procesu.

#### 3.2 Cieľ diplomovej práce

3.2

---

Práca je zameraná na spracovanie zliatiny Cu7.2Ni1.8Si1Cr metódou Slective Laser Melting pre použitie v tenkostenných štruktúrach. Takto vytvorené štruktúry budú následne využívané pri tvorbe tepelných výmenníkov.

---

### 3.2.1 Dílčí cíle diplomové práce

- definovanie hlavných procesných parametrov
- návrh experimentov spoločne s mechanickými skúškami
- realizácia experimentov
- analýza dát a vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov



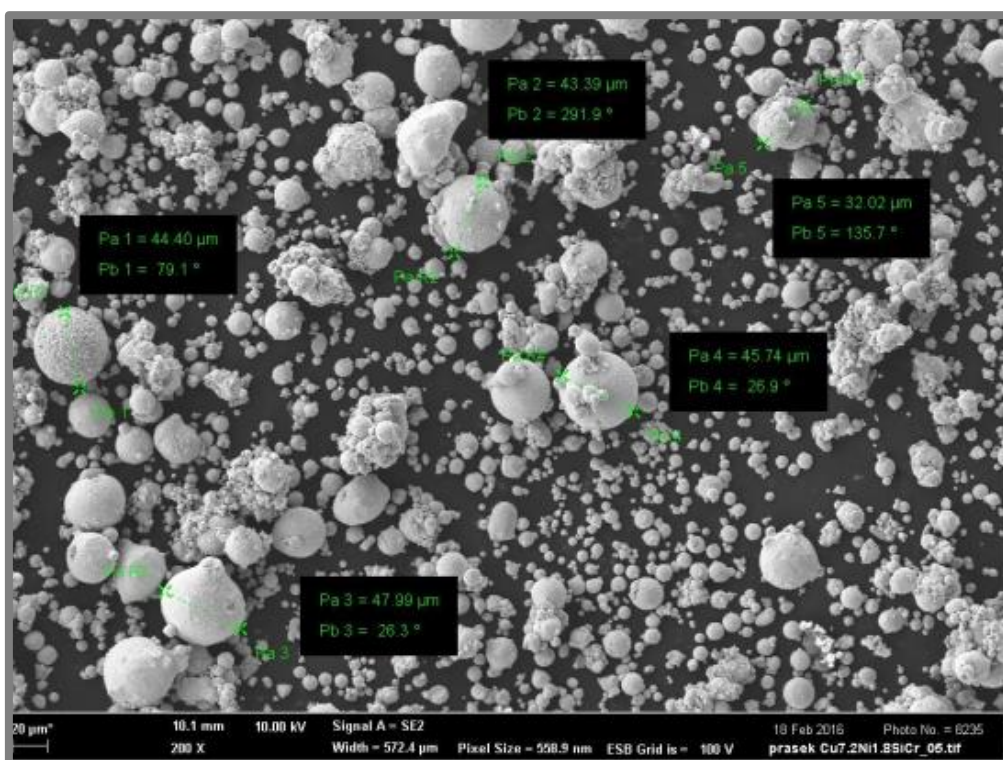
## 4 MATERIÁL A METÓDY

4

### 4.1 Použitý kovový prášok

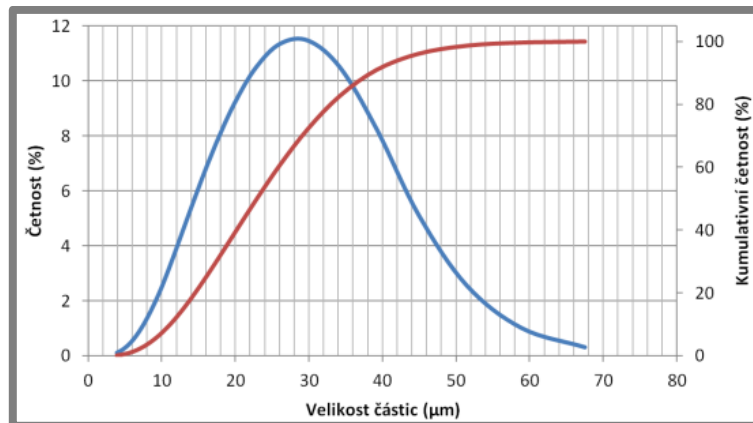
4.1

V práci bol použitý kovový prášok Cu7.2Ni1.8Si1Cr od firmy Sandvik Osprey dodávaný v 20 kg balení a výrobcom deklarovanou priemernou šírkou častíc 22µm (18). Tento prášok bol v predchádzajúcej práci podrobený testu morfológie a distribúcií častíc. Častice prášku na základe SEM analýzy vykazovali sférický tvar vhodný na použitie pre SLM (Obr.26). Miestami prášok obsahuje zhľuky menších častíc s nepravidelným tvarom, čo môže spôsobovať komplikácie pri presúvaní prášku v zásobníku, alebo pri vytváraní vrstvy na stavebnej platforme. Prášok vykazuje veľký rozptyl rozmeru jednotlivých častíc. Táto variabilita je potrebná pre vytvorenie kvalitnej vrstvy prášku, kedy je priestor medzi väčšími časticami zaplnený práve časticami s menším priemerom.



Obr.26 SEM analýza použitého prášku (18)

Analýza distribúcie prášku prebiehala na zariadení LA-950 od firmy HORIBA využívajúce laserovú difrakciu. Takto bola vytvorená distribučná a kumulatívna krivka závislosti na rozmere častíc (Obr.27). Získané dáta potvrdzujú údaje deklarované výrobcom s malou odchýlkou. Analýza prášku dokázala jeho použiteľnosť pri hrúbke nanášanej vrstvy 50µm.



Obr.27 Distribúcia použitého prášku (18)

## 4.2 Použité zariadenie SLM 280 HL

Experimenty budú prebiehať na zariadení s označením SLM 280<sup>HL</sup> od nemeckej firmy SLM Solution GmbH (18)(Obr.28). V ľavej hornej časti sa nachádza stavebná komora, ponúkajúca stavebný priestor s rozmermi 280x280x365 mm. V hornej časti komory sa nachádza okno, ktorým je do komory privedený YLR laser s Gaussovým rozložením intenzity lúča s maximálnym výkonom 400 W (Tab.1).

Obr.28 Zariadenie SLM 280<sup>HL</sup> (18)

Nad stavebnou komorou sa nachádza zásobník nového čistého prášku (Main Tank), ktorý je počas stavby doplňovaný do nanášacieho zariadenia tzv. recouteru. Recouter pomocou lineárneho vedenia nanáša vrstvu prášku s požadovanou hrúbkou na stavebnú platformu. Nadbytočný prášok následne prepadá do kovových fliaš, v ktorých sa po ukončení stavby recykluje a pripravuje na ďalšie použitie. Zariadenie SLM taktiež disponuje obrazovkou, pomocou ktorej je ovládané a monitorované. Tesne nad stavebnou platformou je zabezpečené prúdenie ochrannej atmosféry (N<sub>2</sub>,

Ar2), zabezpečujúce odvádzanie spalín a nečistôt vznikajúcich počas stavby. Rozmery stavebnej komory sú zmenšené pomocou redukčného rámiku na 98x98mm. Do recoatru sú vložené redukcie, slúžiace na zníženie spotreby kovového prášku.

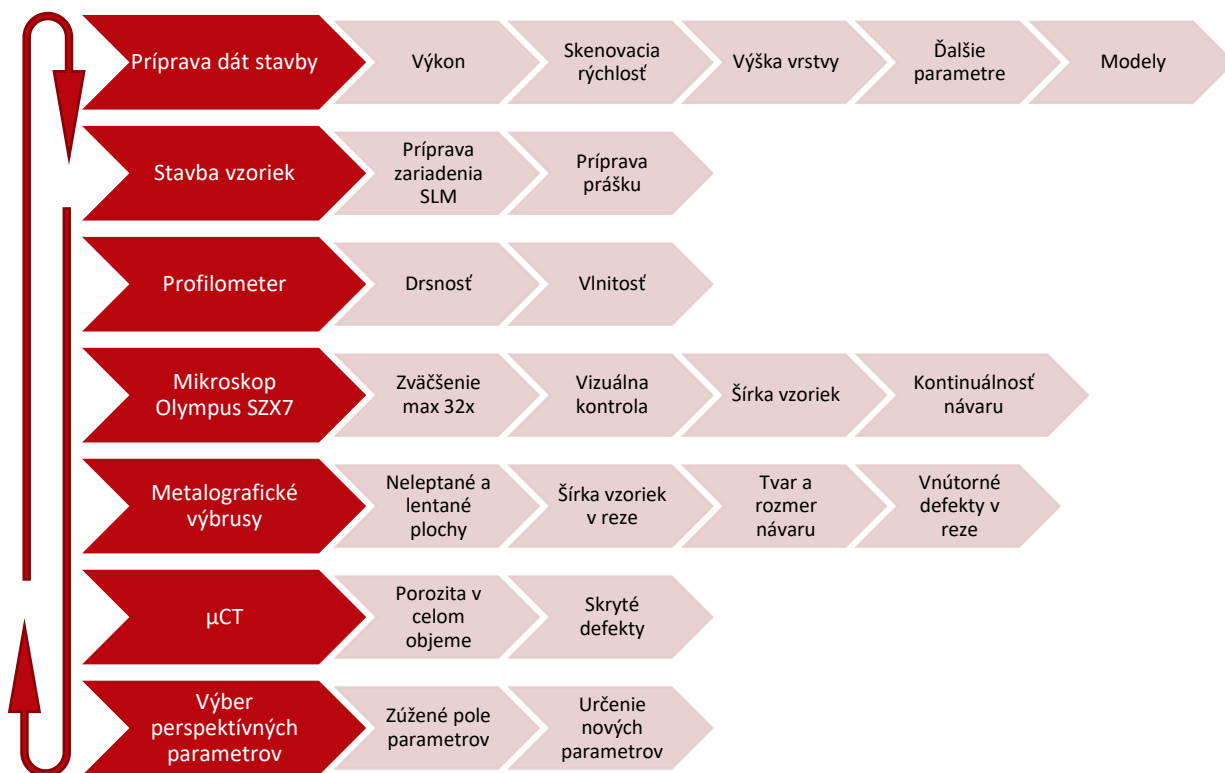
Tab.1 Parametre zariadenia SLM280HL (18)

Stavební prostor	(mm <sup>3</sup> )	(X,Y,Z) 280 x 280 x 350
Tloušťka vrstvy	(μm)	20 - 75
Produktivita	(cm <sup>3</sup> /h)	35
Max. skenovací rychlost	(m/s)	15
Průměr ohniska svazku	(μm)	82
Hmotnost	(kg)	1000
Zdroj inertního plynu	(l/min)	2,5 Ar / N <sub>2</sub>
Vláknový laser	(W)	YLR-Faser-Laser 400
Rozměry	(mm)	(D x V x Š) 1800 x 1900 x 1000

### 4.3 Postup riešenia práce

4.3

Metodika riešenia práce spočívala v stavbe viacerých typov vzoriek rozličnými procesnými parametrami. Takto vytvorené vzorky následne podstúpili komplexnú analýzu naznačenú cyklom na Obr.29.



Obr.29 Diagram postupu práce

Každý jeden experimentálny cyklus začínal prípravou dát na stavbu. Táto časť zahŕňala počiatočnú úvahu s následným výberom vstupných procesných parametrov, ako sú výkon lasera, alebo skenovacia rýchlosť. Pripravené data následne obsahovali modely vzoriek s presne špecifikovaným procesom výroby. Data postupovali do ďalšej etapy, kde prebiehala príprava 3D tlačiarne a kovového prášku. Počas tohto

procesu bola kladený veľký dôraz na čistotu stavebnej komory, kedy boli všetky plochy dôkladne vyčistené, aby nedošlo ku kontaminácii použitého prášku iným materiálom. Samotný prášok bol presiatý pomocou jemného sita, zachytávajúceho väčšie častice. Pred začiatkom stavby bol prášok sušený v peci pri teplote 70°C po dobu 4-8 hodín, čím došlo k odstráneniu vlhkosti. Takto pripravený materiál bol tesne pred spustením stavby presunutý do zásobníka 3D tlačiarne.

Po úspešnej stavbe vytvorené vzorky vstupujú do druhej časti venovanej ich analýzam. Je potrebné podotknúť, že nie všetky vzorky podstupovali rovnakú analýzu pozostávajúcu zo všetkých procedúr zobrazených na Obr.29. Pri takmer všetkých typoch vzoriek bola najskôr vyhodnocovaná drsnosť vytvorených povrchov. Následne prebehla analýza posledného návaru pomocou mikroskopu Olympus SZX7 s maximálnym zväčšením 32x. Ďalšia analýza pozostávala z vytvorenia metalografických výbrusov, kedy boli vytvorené plochy v reze jednotlivých vzoriek. Tu bola vyhodnocovaná ich geometria a mohlo dôjsť k odhaleniu skrytých defektov. Pomocou  $\mu$ CT bola v ďalšej časti sledovaná porozita a jej rozloženie v objeme.

Po získaní všetkých dát prebehla ich syntéza, kedy boli vyhodnocované z viacerých pohľadov. Všetky dáta boli zaznamenané do procesných máp, ktoré ich prehľadne zobrazujú v závislosti na procesných parametroch. Táto časť bola venovaná vyselektovaniu vhodných vzoriek, ktoré sa javia ako perspektívne pre ďalší vývoj. Výstupom bolo úzke pole parametrov, ktoré následne vstupujú do nového experimentálneho cyklu.

---

### 4.4 Procesné parametre

Do výrobného procesu vstupuje veľké množstvo parametrov, ktoré vplyvajú viac či menej na konečnú kvalitu diela. Ich globálne rozdelenie môžeme rozčleniť na štyri kategórie podľa charakteru vstupu na laser, prášok, komora a atmosféra. Každú kategóriu je možné následne deliť do ďalších podkategórií, podľa významu ich vplyvu na základné, vedľajšie a konštrukčné, ktoré sú definované konštrukciou daného zariadenia.

Do kategórie laser spadajú parametre popisujúce nastavenia a vlastnosti lasera. Medzi základné parametre patria jeho výkon (*max 400 W*), *skenovacia rýchlosť* (*max 15 000 mm/s*) a *trajektória skenovania* spojená s *hatch distance* a *skenovacou stratégiou*. Malou zmenou libovolného zo spomenutých parametrov je možné dosiahnuť výrazné odlišné výsledky. Do kategórie vedľajšie je možné zaradiť parameter *focus*, ktorý slúži na zaostrenie paprska do potrebnej hĺbky. Jeho úpravu vykonáva použité zariadenie SLM automaticky. Ďalší z parametrov, ktoré sú nemenné a dané konštrukciou je parameter *spot size* (*80 $\mu$ m*), čiže priemer vytvoreného laserového lúča.

Ďalšia kategória, prášok, spája parametre spojené s materiálom. Medzi základné patrí predovšetkým *voľba materiálu* a jeho *chemické zloženie*. S tým je úzko spojená jeho kvalita, ktorá zahŕňa *distribúciu*, tvar či povrchové vlastnosti ako *odrazivosť*. Tieto parametre hrajú dôležitú úlohu pri tvorbe stavebnej vrstvy prášku, ako aj pri tvorbe



taveniny, kde v dôsledku obsahu veľkých častíc nemusí nastať ich natavenie a zaistenie stabilného stavebného procesu.

Kategória komora spája predovšetkým čistotu stavebného priestoru a jeho *teplotu*. V použitom produkčnom zariadení nie je momentálne možné použiť vyhrievanú stavebnú komoru z konštrukčného hladika. Do výrobného procesu vstupuje parameter *teplota stavebnej platformy*, ktorá býva zvyšovaná pre zníženie teplotného gradientu.

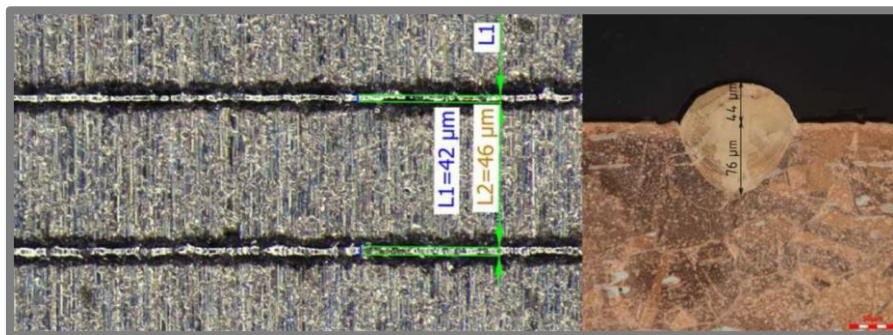
Posledná kategória, atmosféra, zahŕňa parametre inertnej atmosféry vytvorenej počas stavby. Pomocou sŕm môžu byť spracovávané aj reaktívnejšie materiály ako sú titán alebo horčík, ktoré počas tavenia prudko reagujú s kyslíkom. Pre zachovanie bezpečnosti a stability je stavebná komora naplnená *inertným plynom*, ktorý nahradí takmer všetok vzduch a kyslík. Standartne je používaný *argón* a *dusík*. Spracovaný materiál v práci patrí medzi stabilnejšie a preto je volený z ekonomických dôvodov dusík. Medzi vedľajšie parametre patrí napríklad *tlak* vytvorenej atmosféry a *stav filtračného média*.

### 4.5 Experimenty

4.5

---

Riešenie diplomovej práce spočíva čiastočne v nadviazaní na výsledky práce Bc. Martina Kočicu (18). Konkrétne sa vychádzalo z testov jednotlivých návarov (Obr.30), kedy dochádzalo k zmene dvoch parametrov, výkonu laseru a skenovacej rýchlosti.



Obr.30 Analýza samotného návaru (18)

V práci (18) bola vytvorená procesná mapa. Jednotlivé návary sa skúmali z viacerých hľadísk. Ako prvý sa vyhodnocoval vplyv smeru stavby, kedy boli vylúčené parametre, kedy vznikol nestabilný stavebný proces. Ako ďalšia bola vyhodnocovaná kontinualita návaru po jeho celej dĺžke. Ďalší test spočíval v rozrezaní stavebnej platformy v strede návarov. Následne miesto rezu bolo vybrúsené, vyleštené, naleptané a skúmané mikroskopom Olympus GS 51 s 200 až 500násobným zväčšením, kedy sa vyhodnocoval tvar návarov (výška nad platformou, hĺbka, šírka a uhol, ktorý zvierá stena návaru s platformou, prípadne ďalšie defekty).

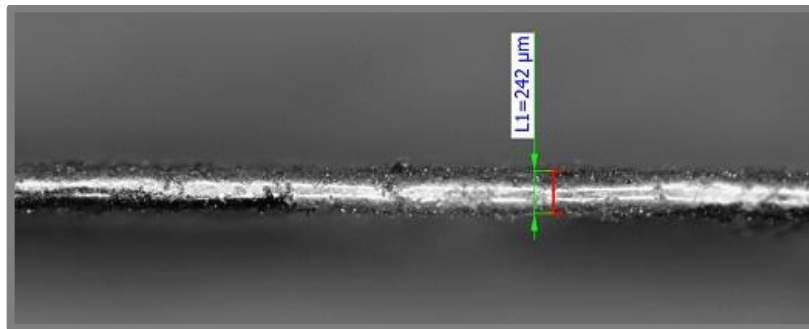
#### 4.5.1 Kolmé steny

4.5.1

---

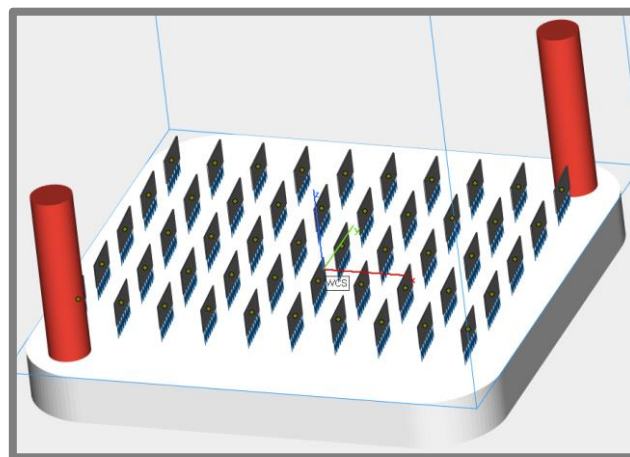
Prvý experiment spočíval v overení špecifikovaného poľa procesných parametrov pri stavbe tenkých stien (Obr.31). V týchto vzorkách bolo vypnuté šrafovanie objemu,

kedy ostala aktívna len kontúra. Prvé vzorky boli tenké steny s rozmermi 0,05-0,25 x 10 x 5 mm (šírka x dĺžka x výška) a s nastavenou kompenzáciou trajektórie laserového lúča 25  $\mu\text{m}$ -táto hodnota vychádza z práce (18). Zmenou z 1D na 3D vzorky mohla nastať zmena teplotného gradientu, tým pádom aj melting pool-u. Ak by neboli nájdené žiadne vyhovujúce vzorky, tak by sa test tenkých stien opakoval s upravenými parametrami na základe získaných výsledkov. V tejto časti bolo vytvorených 100 vzoriek.



Obr.31 Snímka vrchného pohľadu na tenkú stenu

Podobne ako u jednotlivých návarov, bol vyhodnocovaný tvar a kontinualita posledného návaru tenkej steny pomocou mikroskopu Olympus SZX7. Pre analýzu kvality povrchu bol využitý profilometer Bruker Countour GT-X8. V poslednej rade bola skúmaná porozita a šírka stien. Táto analýza prebiehala na metalografických výbrusoch vyleštených vzoriek (Obr.32). Následne pri niektorých vzorkách prebehlo leptanie vzniknutých plôch, kedy sa analýza zamerala na tvar a rozmery návarov.



Obr.32 Rozloženie tenkých stien na stavebnej platforme

Dalšie kolmé steny boli zamerané na overenie zúženého pola procesných parametrov. Takto bolo postavených 12 samostatných kolmých stien. Táto stavba bola zopakovaná 2x v dôsledku neúspešného zopakovania stavby. Keby proces výroby prebehol dobre, tak by vzorky prešli rovnakou analýzou ako pri prechádzajúcej stavbe.

V ďalšej časti boli vytvorené vzorky, ktoré pozostávali zo sady 20 stien vzdialených od seba 100  $\mu\text{m}$ . Cieľom bolo overiť 4 z celkovo 12 skupiny procesných parametrov na vzorkách rozmiestnených v rohových oblastiach stavebnej platformy, kedy by sa

mohol vyskytnúť vplyv polohy vzoriek. Týmto testom bola snaha priblížiť sa bližšie reálnym podmienkam. Analýza stavby prebiehala rovnako v porovnaní s prvým experimento. Ako prvé prebehlo vyhodnotenie kvality posledného návaru spolu s drsnosťou vytvorených povrchov. Pri týchto vzorkách boli taktiež vytvorené metalografické výbrusy.

Nasledujúce postavené vzorky boli modifikovaná verzia sady 20 stien z predchádzajúcej stavby. Nové vzorky obsahovali 10 kolných stien vzdialených od seba 400  $\mu\text{m}$ . Pre overenie všetkých 12 skupín procesných parametrov a vplyvu ich polohy na platforme bolo postavených spolu 48 vzoriek umiestnených v rohových oblastiach stavebného priestoru. Analýza výsledkov prebehla rovnakým spôsobom ako pri predchádzajúcich stenách.

### 4.5.2 Steny pod uhlom 45°

4.5.2

Ako ďalší bol overený vplyv zmeny stavebného uhlu. V ďalšom experimente boli navrhnuté vzorky postavené pod uhlom 45°. Toto je hodnota, kedy by mali byť vzorky samonosné a nehrozí ich kolaps. Do experimentu bolo zahrnutých 12 samostatných stien, ako aj sady obsahujúce 6 stien vzdialených od seba 400  $\mu\text{m}$ . Opäť prebehla štandardná analýza, ktorá bola čiastočne zameraná na rozdiel kvality vrchnej a spodnej plochy.

Ako posledný test bolo postavených 9 sad 6 stien pod uhlom 45° pomocou skupiny parametrov č. 1. Na spodné plochy vzoriek bola použitá špeciálna stratégia stavby s názvom down skin. Cieľom bolo overiť vplyv tejto stratégie na výsledky.

V závere práce boli vytvorené 3 sady 10 kolných stien pomocou skupiny parametrov č. 1, ktoré boli určené na analýzu pomocou  $\mu\text{Ct}$ .

### 4.5.3 Vyhodnotenie porozity mikroskopom Olympus SZX7

4.5.3

Vyhodnotenie porozity pomocou metalografických výbrusov je relatívne jednoduchá, ekonomicky výhodná metóda, ktorá je postačujúca v prvých etapách tejto práce. Táto metóda je citlivá predovšetkým na výber skúmanej oblasti. V prvej časti vyhodnocovania porozity materiálu je potrebné vytvoriť metalografické výbrusy. Vopred pripravené vzorky sa vložia do malej vaničky a zalejú sa epoxidovým systémom EpoThinTM 2. Po vytvrdnutí nasleduje brúsenie vzoriek na metalografickej brúske LECO GPX300 pomocou karborundových brúsnych papierov so zrnitosťou 1 000-4 000. Po základnom brúsení nasleduje leštenie diamantovou pastou s veľkosťou častíc 3 a 1  $\mu\text{m}$ . Takto pripravené vzorky sú skúmané mikroskopom Olympus SZX7, ktorý je vybavený digitálnym fotoaparátom Canon EOS 1200D. Nasnímané vyleštené plochy sú následne uložené v počítači pomocou programu QuickPHOTO MICRO. Vyhodnotenie porozity teda prebieha iba v jednej vrstve. Obrazová analýza spočíva vo vybratí oblasti, na ktorej bude meraná porozita pomocou programu ImageJ a jeho nadstavby Fiji. Program rozlišuje biele pixely od čiernych, ktoré reprezentujú porozitu a plný materiál.

### 4.5.4 Vyhodnotenie porozity pomocou počítačovej tomografie

4.5.4

Na niektorých vzorkách bude porozita vyhodnocovaná pomocou počítačovej tomografie. Za týmto cieľom bude použité  $\mu\text{CT}$  z Ústavu fyziky materiálu. Metóda

počítačovej tomografie je neinvazívna, najpresnejšia a najrýchlejšia, ale finančne náročná. Pri vytváraní prierezov daným materiálom je používané RTG žiarenie a následne pomocou programu je vytvorený kompletný 3D model súčasti.

---

### 4.5.5 Profilometer

Vyhodnotenie povrchu drsnosti prebieha na 3D optickom interferometri Bruker Contour GT-X8, ktorý využíva bezkontaktné metódy. Získané data z profilometru sú spracované a vyhodnotené v programe Vision 64.

Hneď po stavbe boli všetky postavené vzorky vložené do ultrazvukovej čističky a následne pomocou tlakového vzduchu vyfúkané pre odstránenie zostatkového prášku..



## 5 VÝSLEDKY

5

### 5.1 Test kolmých stien 1

5.1

Prvý vytvorený test pozostával zo stavby tenkých stien, ktorého hlavnou úlohou bolo overiť procesné parametre, ktoré vychádzali zo štúdie Bc. Martina Kočicu (18) a získanie prvotných informácií spojených so stavbou tenkých stien zo zliatiny Cu7.2Ni1.8Si1Cr. Samotný experiment zahŕňal veľký rozptyl procesných parametrov, ktorý by mal naznačiť perspektívnu oblasť použitia.

#### 5.1.1 Príprava a popis experimentu

5.1.1

Samotný experiment obsahoval 100 tenkých stien postavených na dvoch platformách (dávka 1, dávka 2), ktorých šírka sa menila od 50 do 250  $\mu\text{m}$  (s krokom 50  $\mu\text{m}$ ). Pri stavbe bolo vypnuté vnútorné šrafovanie, kedy aktívna ostala len kontúra, pozostávajúca z jednej trajektórie lasera. Vzorky boli stavané s výkonom lasera 350 W a 400 W. V dôsledku dobrej tepelnej vodivosti medi neboli testované nižšie výkony. Skenovacia rýchlosť bola volená od 800 mm/s do 1000 mm/s (s krokom 50 mm/s) na prvej testovacej dávke vzoriek. Druhá dávka bola stavaná pomocou vyšších skenovacích rýchlostí, ktoré začínali na 1100 mm/s a končili pri hodnote 1700 mm/s (s krokom 150 mm/s), predovšetkým za cieľom overenia väčšieho množstva procesných parametrov, ktoré by mohli v konečnom dôsledku urýchliť stavbu a tým pádom znížiť finančné nároky na celý výrobný proces. Pri všetkých vzorkách bol nastavený parameter beam compensation 25 $\mu\text{m}$ . Táto hodnota vychádzala z práce Bc. Martina Kočicu (18), kedy sa šírky jednotlivých návarov v danom rozsahu použitých procesných parametrov pohybovali v rozmeroch od 30  $\mu\text{m}$  do 60 $\mu\text{m}$ . Snahou bolo vytvoriť najtenšie možné vyrobiteľné steny, ktoré by pozostávali len z jednej trajektórie lasera.

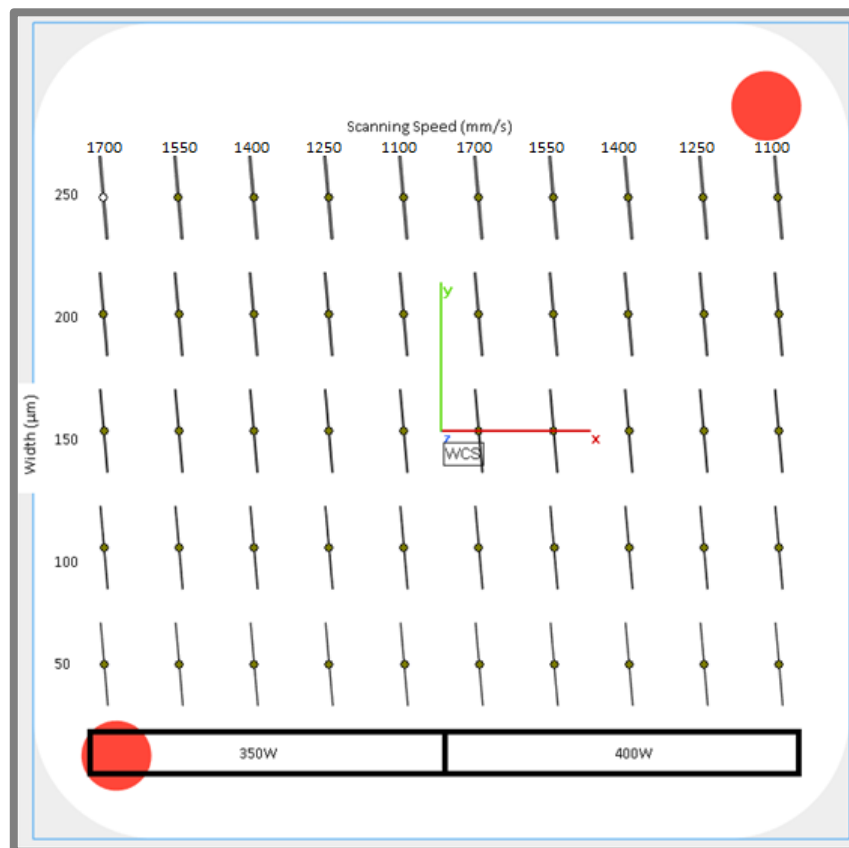
Software 3D tlačiarne Materialise Magics pri tvorbe kontúry neumožňuje vytvoriť len jednu trajektóriu lasera, ako sa očakávalo, ale vždy požaduje vytvorenie uzatvoreného obrazca – kontúry (uzatvorenie vnútorného objemu). Tým pádom nebolo možné vytvoriť steny s hrúbkou 50  $\mu\text{m}$  pri nastavenom parametre beam compensation 25  $\mu\text{m}$ . V dôsledku toho bol upravený rozmer najtenšej steny na hrúbku 51  $\mu\text{m}$ , kedy trajektória lasera opisuje obdĺžnik so šírkou 1  $\mu\text{m}$ . V dôsledku zväčšovania šírky stien sa očakávalo, že pri šírke návarov približne 150  $\mu\text{m}$  nastane oddelenie a vzniknutie dvoch separovaných stien so šírkou jedného návaru.

#### 5.1.2 Rozloženie vzoriek na platformách

5.1.2

Všetky vzorky boli pootočené tak, aby zvierali uhol 95° voči nanášaciemu britu, ktorý zabezpečuje rovnomerné rozloženie vrstvy prášku. Pri uhle 90° by mohlo dôjsť v dôsledku vzniknutej nerovnosti na vzorke k úplnému prerušeniu vrstvy a následnému remelting-u bez prášku. Na Obr.33 je zobrazené rozloženie vzoriek podľa zmeny procesných parametrov tak, ako boli umiestnené na základnej platforme počas stavby. Platforma bola rozdelená na dve polovice. Ľavá bola stavaná výkonom lasera 350 W, pravá s výkonom 400 W. Stĺpce reprezentujú vzorky stavané rovnakou rýchlosťou, ktorej hodnota je zobrazená na vrchnej časti a riadky obsahujú vzorky s rovnakou šírkou. Druhá dávka vzoriek je stavaná rovnakým spôsobom, kedy došlo

iba k zmene skenovacích rýchlostí lasera. Pre prehľadnosť je uvedená aj Tab.2 s parametrami a označením vzoriek 1-50.



Obr.33 Rozloženie vzoriek na platforme

Tab.2 Označenie vzoriek na platforme 1,2

		Scanning speed (mm/s)									
Platforma 1		1000	950	900	850	800	1000	950	900	850	800
Platforma 2		1 700	1550	1400	1250	1100	1 700	1550	1400	1250	1100
Width (μm)	250	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	200	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	150	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	100	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	50	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Laser Power		350W					400W				

## 5.1.3 Príprava a priebeh stavby

Samotná stavba prebiehala štandardne bez problémov. Ako prvé bolo zariadenie SLM dôkladne vyčistené od nečistôt, aby nedošlo ku kontaminácii kovového prášku iným materiálom. Následne bol prášok sušený v peci pri teplote 70°C približne 4 hodiny. Hneď po sušení bol prášok presunutý do nanášacieho zariadenia, tzv. recoater, a uzatvorený v stavebnej komore pod ochrannou atmosférou dusíka, kým bola stavba

spustená. Rovnaký proces prípravy bude prebiehať pri všetkých experimentoch v tejto práci (Obr.34).



Obr.34 Vzorky hneď po stavbe

### 5.1.4 Analýza kolmých stien

5.1.4

Prvá stavba pozostávala z tenkých stien umiestnených kolmo voči platforme. Jednotlivé steny boli podrobené bezprostredne po stavbe vizuálnej analýze, ktorá bola zameraná na kvalitu posledného vytvoreného návaru. V ďalšej časti boli vzorky oddelené od stavebnej platformy, aby bolo možné pomocou profilometru vyhodnotiť kvalitu povrchu jednotlivých stien. Posledná analýza sa zamerala na tvar a rozmery jednotlivých návarov v reze, kedy boli vzorky vybrúsené, vyleštené a následne naleptané. Jednotlivé výsledky sú podrobne rozobrané v nasledujúcich kapitolách.

### 5.1.5 Analýza posledných návarov

5.1.5

Prvá analýza spočívala vo vyhodnotení kvality posledného návaru stavby, kedy všetky vzorky boli pozorované pohľadom zhora pomocou mikroskopu Olympus SZX7 vybaveným fotoaparátom Canon EOS 1200D pri 16 a 32 násobnom zväčšení. Zaznamenané snímky boli následne spracované pomocou programu QuickPHOTO MICRO a bola zmeraná šírka jednotlivých stien. Všetky zaznamenané snímky a namerané hodnoty sú zobrazené v prehľadnej mape v prílohe 1, 2, 3, 4.

Prvotné zhodnotenie potvrdilo očakávané výsledky. Počas stavby boli vytvorené vzorky vykazujúce nestabilný stavebný proces, a tých bola väčšina. Takisto sa na platforme nachádzali vzorky, ktoré sa javili perspektívne. Prvé vyhodnotenie spočívalo v sledovaní kontinuity návarov. Jednotlivé výsledky boli rozdelené do troch kategórií a názorne zobrazené v Tab.3 a Tab.4. Červenou farbou sú znázornené návary, ktoré nie sú kontinuálne, vykazujú veľa defektov, napríklad veľké množstvo nataveného alebo pretaveného prášku, prípadne diery rozdeľujúce návar na viacero častí. Oranžovou farbou sú označené steny, pri ktorých nastal jav opakujúci sa pri 16 % vzoriek. Približne v poslednom milimetri stavby došlo pri niektorých vzorkách k dodatočnému nataveniu prášku a značnému oddialeniu jednotlivých návarov (Obr.35). Zelená farba zobrazuje vzorky s kvalitným návarom bez väčších defektov.

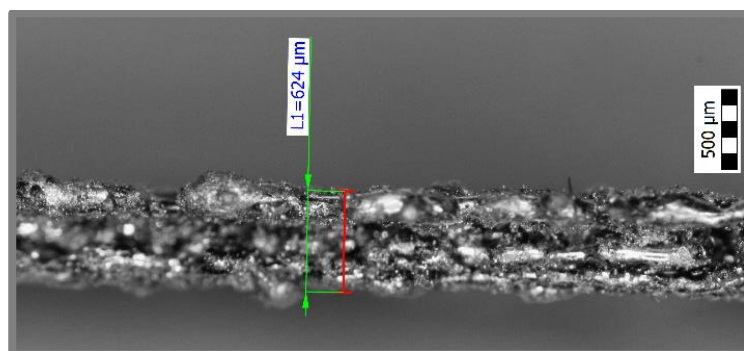
Tab.3 Vyhodnotenie kvality návarov pohľadom zhora platforma 1 (zelená-kvalitné, oranžová-defekty pri konci stavby, červená-veľké množstvo defektov)

Platforma 1		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu (μm)	250	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	200	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	150	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	100	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	50	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1000	950	900	850	800	1000	950	900	850	800

Tab.4 Vyhodnotenie kvality návarov pohľadom zhora platforma 2 (zelená-kvalitné, oranžová-defekty pri konci stavby, červená-veľké množstvo defektov)

Platforma 2		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu (μm)	250	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	200	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	150	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	100	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	50	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1700	1550	1400	1250	1100	1700	1550	1400	1250	1100

Na základe tabuliek je zrejmé, že kvalitnejší stavebný proces nastal v prípade prvej platformy, ktorá obsahovala vzorky stavané menšou rýchlosťou. Najviac kvalitných návarov vznikalo práve pri najmenej testovanej skenovacej rýchlosti a to 800 mm/s. Zvyšovanie rýchlosti malo za následok vznik nestabilného stavebného procesu. V prípade druhej platformy bolo vytvorených len minimum kvalitných návarov, čo naznačuje trend popisujúci vplyv rýchlosti na konečnú kvalitu stavby. Predovšetkým pri vyšších rýchlostiach od 950 mm/s a stenách s hrúbkou do 100 μm dochádza k vzniku rozdvojenej steny cca pri poslednom milimetri stavby. Tento jav je možné sledovať pri oboch výkonoch lasera.



Obr.35 Defekt objavujúci sa pri poslednom milimetri stavby (vzorky platforma 1-35, 41, 42, 47, platforma 2-31, 35, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 47)

V tejto časti boli vyhodnocované a porovnávané šírky stien s vytvorenými CAD modelmi. Jednotlivé namerané hodnoty sú zobrazené v Tab.5 Tab.6.

Tab.5 Namerané hrúbky stien pohľadom zhora platforma 1

Platforma 1		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu/Reálne namerané hodnoty( $\mu\text{m}$ )	250	448	413	467	442	449	444	425	456	456	437
	200	382	382	408	394	369	368	381	443	406	400
	150	315	272	303	279	267	267	286	279	279	298
	100	352	339	321	376	509	351	375	456	376	412
	50	595	534	298	267	279	236	582	230	236	242
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1000	950	900	850	800	1000	950	900	850	800

Tab.6 Namerané hrúbky stien pohľadom zhora platforma 2

Platforma 2		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu/Reálne namerané hodnoty( $\mu\text{m}$ )	250	360	340	369	393	340	340	335	374	436	412
	200	291	304	294	347	297	290	310	340	315	351
	150	267	222	244	242	272	291	293	291	320	303
	100	479	406	363	570	600	582	418	624	522	267
	50	159	716	691	688	673	383	643	364	364	219
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1700	1550	1400	1250	1100	1700	1550	1400	1250	1100

Táto časť bola zameraná na porovnanie výsledkov 1D vzoriek s 3D tenkostennými vzorkami. Na základe informácií získaných z jednotlivých návarov vytvorených v práci Bc. Martina Kočicu (18) boli očakávané hrúbky stien pohybujúce sa okolo hodnoty 80  $\mu\text{m}$ . Išlo o prvotný odhad. Z nameraných výsledkov zobrazených v Tab.5 a Tab.6 je zrejmé, že počas stavby 3D vzoriek dochádza k výrazným zmenám v stavebnom procese v porovnaní s 1D vzorkami. Najtenšie hrúbky stien sa pohybovali približne od 220  $\mu\text{m}$  vyššie. Presnejšou analýzou hrúbky stien sa bude práca zaoberať v nasledujúcej kapitole.

### 5.1.6 Vyhodnotenie šírky stien z metalografických výbrusov

5.1.6

V ďalšom riešení práce boli vytvorené v jednom reze vzoriek metalografické výbrusy. Určovanie šírky stien pomocou výbrusov ponúka presnejšie informácie o priereze a samotnom rozmere stien, ako pri analýze posledného návaru pri pohľade zhora. Na druhej strane je táto metóda výrazne citlivá na voľbu daného rezu a kvality vytvorených plôch. Taktiež sa v tejto časti môžu ukázať defekty nachádzajúce sa vo vnútri stien, ktoré neboli predtým viditeľné. Na výbrusoch bude možné sledovať, kedy dôjde k oddeleniu jednotlivých návarov a vzniku oddelených stien. Po zmeraní šírky stien boli vzorky vyleštené a plochy naleptané. Na takto pripravených plochách je možné následne skúmať tvar a rozmery jednotlivých návarov v reze.

Meranie šírky vzoriek pomocou výbrusov pozostávalo z ich nafotenia mikroskopom pri 50 a 100 násobnom zväčšení a následnom vyhodnotení pomocou počítačového softwaru. Namerané hodnoty sú prehľadne zobrazené v Tab.7 a Tab.8. Výsledné hodnoty v tabuľkách boli vytvorené priemerom dvoch meraných hodnôt.

Tab.7 Namerané hrúbky stien pomocou metalografických výbrusov platforma 1

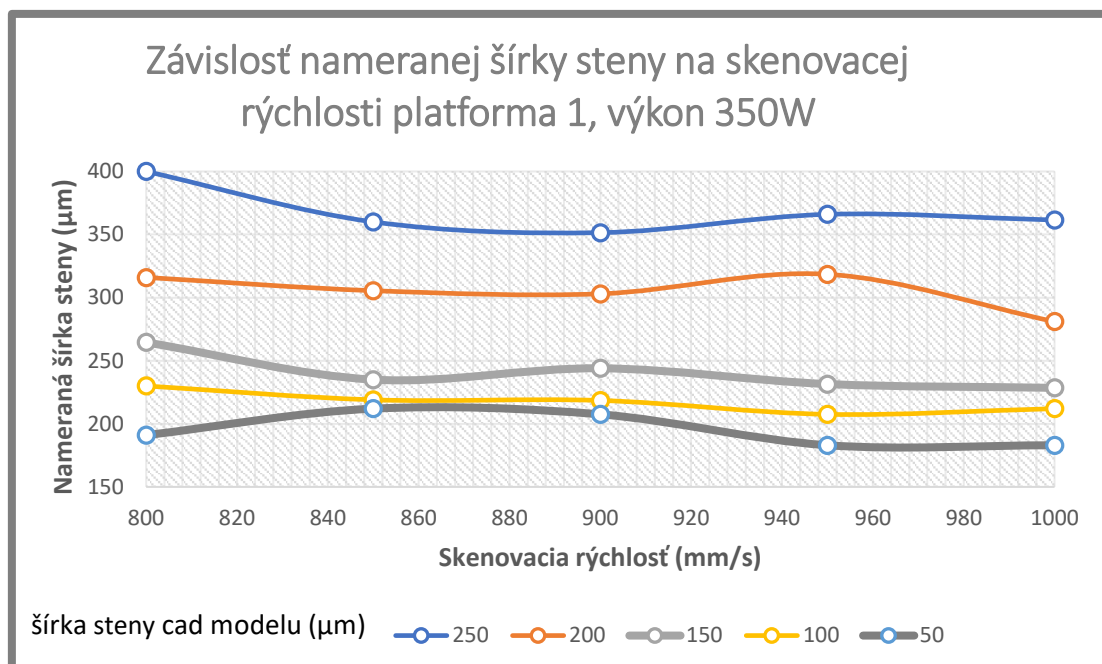
Platforma 1		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu (μm)	250	361	366	351	360	400	342	373	380	376	397
	200	281	318	303	305	316	316	311	335	325	343
	150	228	231	244	235	264	235	245	252	244	273
	100	212	207	218	219	230	217	220	231	235	252
	50	183	183	207	212	191	209	212	202	222	220
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1000	950	900	850	800	1000	950	900	850	800

Tab.8 Namerané hrúbky stien pomocou metalografických výbrusov platforma 2

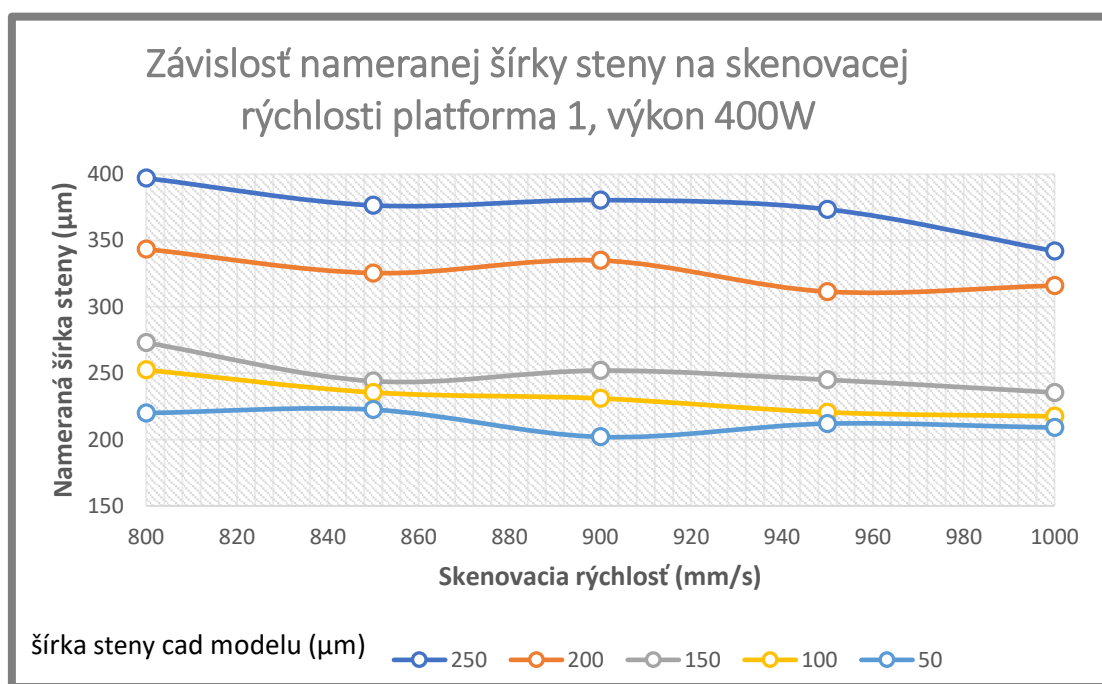
Platforma 2		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu (μm)	250	314	326	325	343	377	321	342	358	349	383
	200	265	281	271	296	306	279	288	286	319	336
	150	231	238	235	303	270	224	228	243	254	253
	100	144	163	165	175	216	160	173	154	182	206
	50	129	131	156	145	176	115	133	138	177	174
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1700	1550	1400	1250	1100	1700	1550	1400	1250	1100

Hlavnou výhodou určovania šírky návarov z výbrusov je odstránenie nahodných javov, ktoré mohli skresľovať výsledky získané pri analýze posledného návaru pri pohľade zhora v predchádzajúcej časti práce. Výsledné hodnoty širok stien boli porovnané so šírkami stien získaných pohľadom zhora, kedy bola určená priemerná odchýlka oboch meraní. V prípade prvej platformy sa namerané hodnoty líšia priemerne o 77μm. Pri druhej platforme je rozdiel priemerne 53μm. V oboch prípadoch boli namerané menšie hodnoty pri analýze metalografických výbrusov. Na základe získaných informácií bude v nasledujúcom určovaní širok stien používaná prevažne metóda využívajúca metalografické výbrusy. Na Obr.36, Obr.37, Obr.38 a Obr.39 sú zobrazené jednotlivé namerané hodnoty v závislosti na rýchlosti.



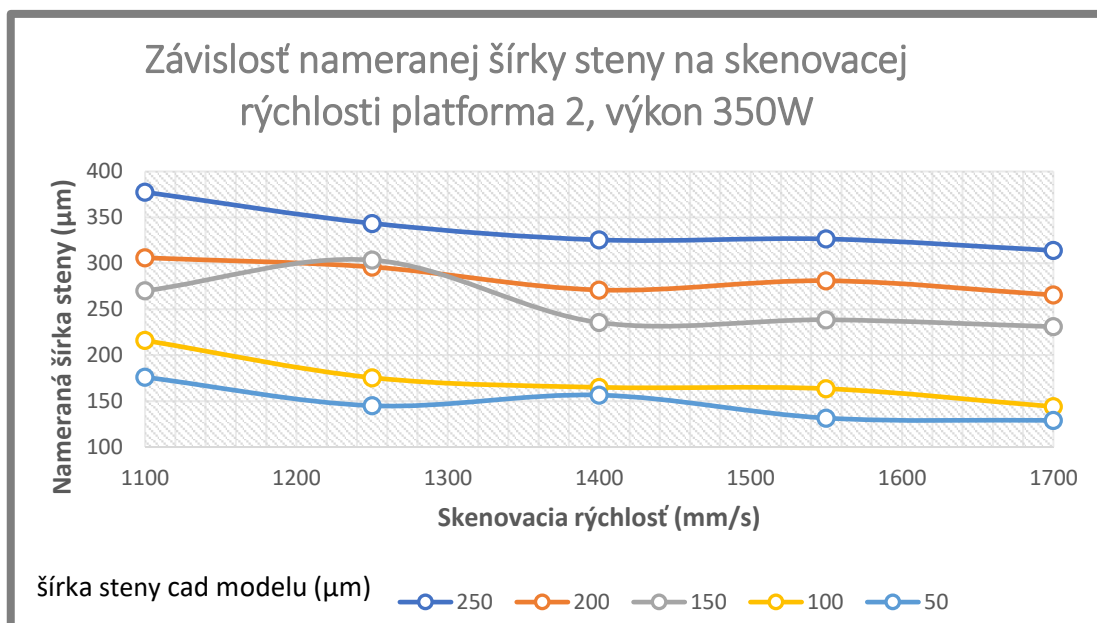


Obr.36 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 1, 350 W

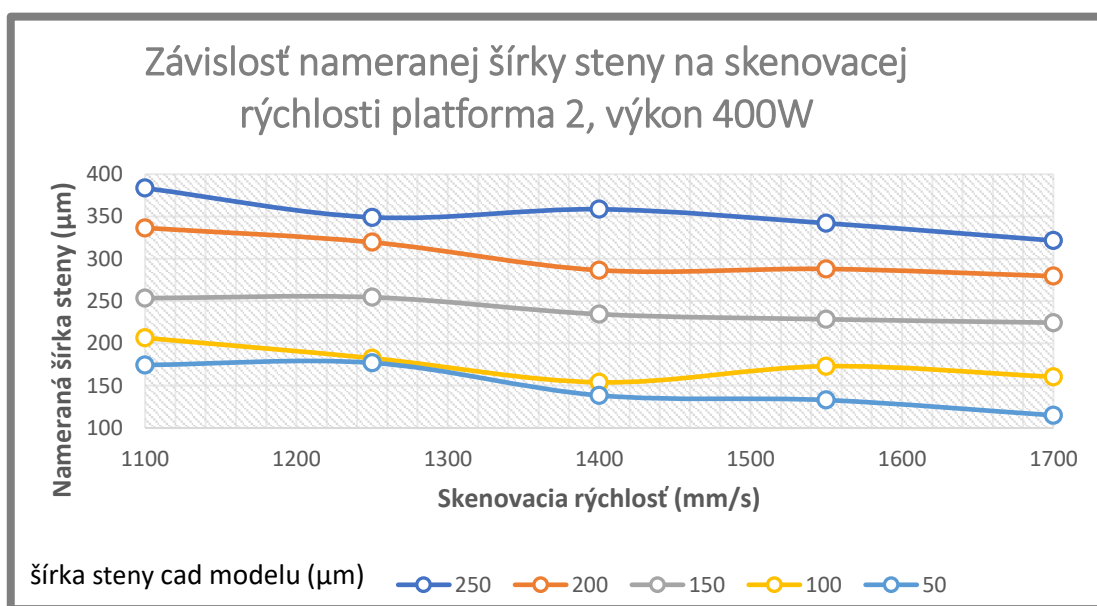


Obr.37 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 1, 400 W

Obr.36 (Obr.37) zobrazuje namerané hodnoty na platforme 1 vytvorené výkonom lasera 350W a (400 W). Grafy už neobsahujú extrémny, ktoré sa nachádzali na vzorkách pri pohľade zhora stavanými skenovacími rýchlosťami 950 a 1000 mm/s. V porovnaní s prvou metódou určovania širok stien majú krivky plynulejší priebeh v závislosti na zmene skenovacej rýchlosti. Ako sa očakávalo, najmenšie šírky stien boli namerané pri vzorkách vytvorených pomocou najvyššej rýchlosti a menším výkonom lasera. Takéto procesné parametre majú za následok zníženie množstva energie dodávanej do návaru, čo spôsobuje vznik menšej tavnej plochy a zúženie šírky výslednej steny.



Obr.38 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 2,350 W



Obr.39 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 2,400 W

Vývoj zmeny šírky v závislosti na skenovacej rýchlosti druhej platformy je zobrazený na Obr.38 Obr.39. Rovnako ako pri prvej platforme je zrejmé, že so zvyšujúcou skenovacou rýchlosťou dochádza podľa očakávania k tvorbe tenších stien.

### 5.1.7 Zhodnotenie šírky stien s kontinualitou návaru

V tejto časti sú posudzované namerané rozmery spoločne s kvalitou jednotlivých návarov. V prvej časti budú jednotlivé vzorky vyhodnocované na základe kvality, čím sa počet perspektívnych stien zredukuje. Následne k nim bude priradená nameraná šírka a v ďalšej kapitole analyzovaná kvalita povrchu vzoriek.



## VÝSLEDKY

V prvom porovnaní sa vychádzalo z Tab.3 tTab.4, ktoré zobrazujú náhľad na vzorky na základe kvality jednotlivých návarov. Tieto výsledky boli porovnané so snímkami získanými na mikroskope pri 50, 100 a 200 násobnom zväčšení. Takto získané informácie sú následne zobrazené v Tab.9 Tab.10.

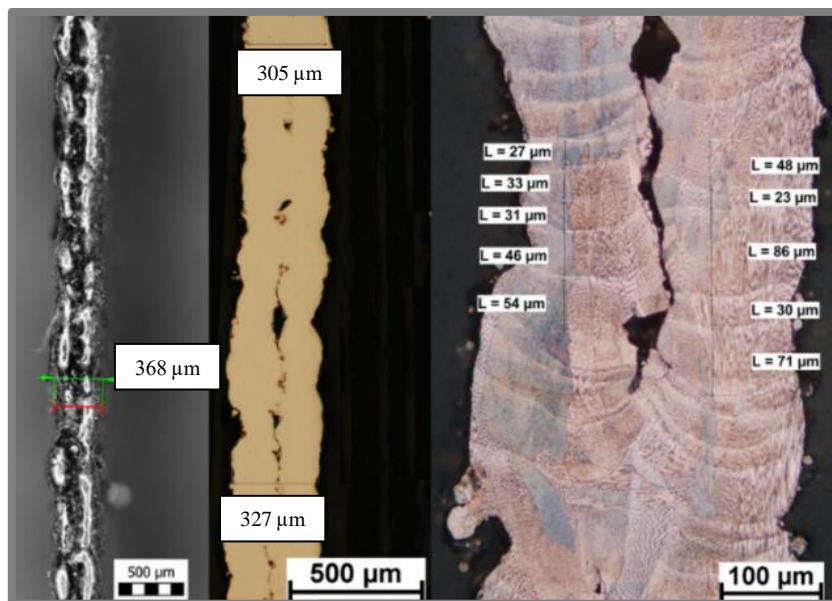
Tab.9 Zúžený výber kvalitných vzoriek platforma 1 (zelená-vybraté, červená-vylúčené vzorky)

Platforma 1		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu (μm)	250	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	200	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	150	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	100	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	50	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1000	950	900	850	800	1000	950	900	850	800

Tab.10 Zúžený výber kvalitných vzoriek platforma 2 (zelená-vybraté, červená-vylúčené vzorky)

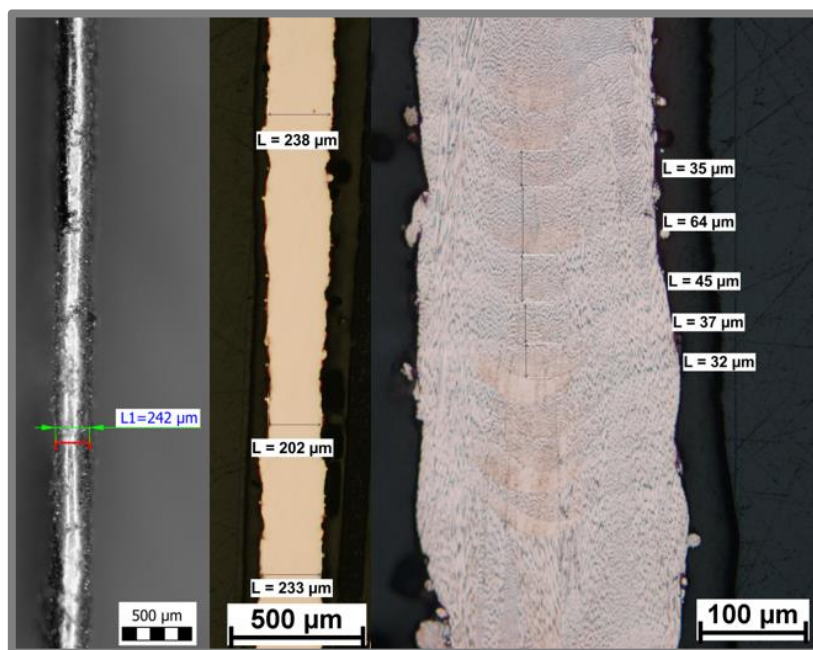
Platforma 2		Výkon lasera (W)									
		350					400				
Šírka steny CAD modelu (μm)	250	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	200	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	150	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	100	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	50	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Skenovacia rýchlosť (mm/s)		1700	1550	1400	1250	1100	1700	1550	1400	1250	1100

Na základe porovnania boli odobrané alebo pridané vzorky do ďalšej analýzy. Červenou farbou sú znázornené vzorky, ktoré obsahovali viaceré defekty, nespojitý návar, prípadne narušený povrch. Na Obr.40 sú zobrazené všetky tri snímky zobrazujúce vľavo pohľad na návar zhora, kde sú jednoznačne viditeľné defekty posledného návaru. Stredný obrázok zobrazuje metalografický výbrus steny, kde je viditeľná nekvalitná stena s viacerými výstupkami a zúženiami. Obrázok vpravo zobrazuje vzorku po naleptaní. Viditeľné návary sú nepravidelné a deformované.



Obr.40 Snímky použité pri vyhodnocovaní vzoriek 1-nevhodný

Vzorky označené zelenou farbou obsahujú kvalitný kontinuálny návar bez výraznejších defektov. Obr.41 vľavo zobrazuje takýto návar pri pohľade zhora. V strednej časti obrázku je zobrazený prierez týmto návarom, kde je viditeľná kvalitná stena bez väčšieho množstva nataveného prášku či výstupkov. V pravej časti obrázku sú viditeľné pravidelné návary, ktorých rozmery sa pohybujú od 32-64 µm.



Obr.41 Snímky použité pri vyhodnocovaní vzoriek 2-vhodný

### 5.1.8 Vyhodnotenie drsnosti

V ďalšej časti analýzy prvých testovacích vzoriek bolo vyhodnotenie kvality všetkých vytvorených povrchov na profilometri Bruker. V Tab.11 sú zobrazené namerané hodnoty drsnosti povrchu pre zúžené pole vzoriek spolu s použitými procesnými parametrami a hrúbkami stien.

Tab.11 Užšie pole skupín procesných parametrov s drsnosťou

Číslo parametra	Číslo steny	Výkon (W)	Sken. r. (mm/s)	odsadenie (μm)	Drsnosť (μm)	Hrúbka (μm)
1	48_1	400	900	1	11	202
2	46_2	400	1700	1	11,2	115
3	41_2	350	1700	1	11,8	129
4	49_1	400	850	1	10,5	222
5	49_2	400	1250	1	13,8	177
6	42_2	350	1550	1	12,4	131
7	50_1	400	800	1	9,1	220
8	50_2	400	1100	1	12,5	174
9	34_1	350	850	50	12,5	219
10	25_1	350	800	100	10,1	264
11	19_1	400	850	150	10,9	325
12	30_1	400	800	100	11,8	273

Hodnoty drsnosti povrchu pri vybraných vzorkách sa pohybovali od 9,1 do 13,8 μm. Tieto hodnoty boli merané hneď po stavbe bez dodatočného opracovania.

### 5.1.9 Zhrnutie výsledkov prvého experimentu

Prvý experiment pozostával zo stavby obsahujúcej 100 tenkých stien, ktoré boli stavané s rozličnými parametrami. Cieľom experimentu bolo v prvej časti overiť široké pole procesných parametrov, a tým vymedziť oblasti, ktoré budú v ďalšej časti riešenia práce podrobnejšie analyzované. Ďalším cieľom bolo preskúmať deje vyskytujúce sa pri stavbe tenkých stien. Hlavným cieľom technológie SLM je používať vytvorené komponenty v stave hneď po stavbe (as-printed), teda bez dodatočného spracovania, ako je brúsenie či pieskovanie. Preto boli všetky vzorky vyhodnocované v rovnakom stave, as-printed. Analýza vzoriek pozostávala z troch hlavných častí. Prvá časť sa venovala prevažne vizuálnej kontrole posledného návaru stavby. Takto získané výsledky podali prvotnú informáciu o kvalite jednotlivých stien. Zároveň bola meraná šírka návarov pri pohľade zhora, kedy boli poskytnuté predbežné informácie o dosiahnutých hrúbkach stien. Druhá analýza pozostávala z vytvorenia metalografických výbrusov, pomocou ktorých bolo možné sledovať tvar a kvalitu stien v jednom reze. Táto metóda ponúka presnejšie informácie ako metóda použitá v prvej časti analýzy pohľadom zhora. Na druhej strane je potrebné zohľadniť pri vyhodnocovaní výbrusov citlivosť na voľbu rezu a kvalitu vytvorených plôch. V tejto časti vyhodnotenia boli objavené niektoré defekty nachádzajúce sa vo vnútri vzoriek. Po vyhodnotení tvaru a rozmeru stien boli vyleštené plochy naleptané. Ďalšia analýza sa zamerala na tvar a rozmery jednotlivých návarov v reze. Posledná časť pozostávala v určení drsnosti povrchu jednotlivých stien pomocou profilometru.

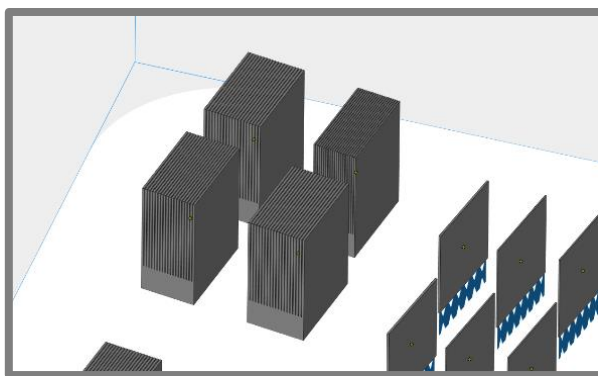
Na základe spomínaných analýz bola väčšina vzoriek vylúčená v dôsledku defektov. V závere bola vytvorená tabuľka 12 skupín procesných parametrov, ktoré vykazovali dobré vlastnosti, kvalitný návar, minimum defektov a dobrú kvalitu povrchu.

### 5.2 Test kolmých stien 2

Na základe prvého testu tenkých kolmých stien bolo vybraných 12 skupín procesných parametrov (Tab.11) pomocou ktorých boli dosiahnuté dobré výsledky. Druhý test bol zameraný na overenie opakovateľnosti, kedy bolo znova postavených 12 tenkých stien pomocou už spomenutých skupín procesných parametrov. Diplomová práca je zameraná na tenkostenné a štrukturované tepelné výmenníky a chladiče, ktorých konštrukcia spočíva z veľkého počtu tenkých lamel poskládaných tesne vedľa seba za cieľom maximálneho zvýšenia výmennej plochy. V dôsledku toho boli do testu zakomponované vzorky obsahujúce 20 tenkých stien vzdialených od seba 100  $\mu\text{m}$  postavené taktiež zúženým poľom procesných parametrov. Vzorky sa viac približujú stavebným podmienkam reálnych komponentov, v ktorých počas stavby dochádza k rozdielnej tepelnej distribúcií v porovnaní so samostatnými tenkými stenami.

#### 5.2.1 Príprava a popis experimentu 2

Druhý experiment pozostával z 12 kolmých stien postavených pomocou 12 užšie špecifikovaných skupín procesných parametrov na jednu stavebnú platformu (Tab.11). Taktiež boli postavené 4 vzorky obsahujúce 20 tenkých kolmých stien. Na ich stavbu boli použité skupiny parametrov 1, 6, 7, 9. Prvá časť bola zameraná na sledovanie zmeny výsledkov v porovnaní so samostatnými stenami. Každá sada 20 stien bola postavená 4x v rohových oblastiach stavebnej platformy posunutých o 50 mm. Toto rozloženie bolo zvolené za cieľom porovnania vplyvu polohy jednotlivých vzoriek na stavebný proces (Obr.42). Vzorky bližšie k vstupu inertného plynu do stavebnej komory môžu vykazovať iné výsledky oproti vzorkám nachádzajúcim sa na vzdialenejšej strane stavebnej platformy. V dôsledku prúdenia inertnej atmosféry v tesnej blízkosti nad povrchom poslednej postavenej vrstvy nastáva odnášanie vytvorených spálenín nad už postavené vzorky.

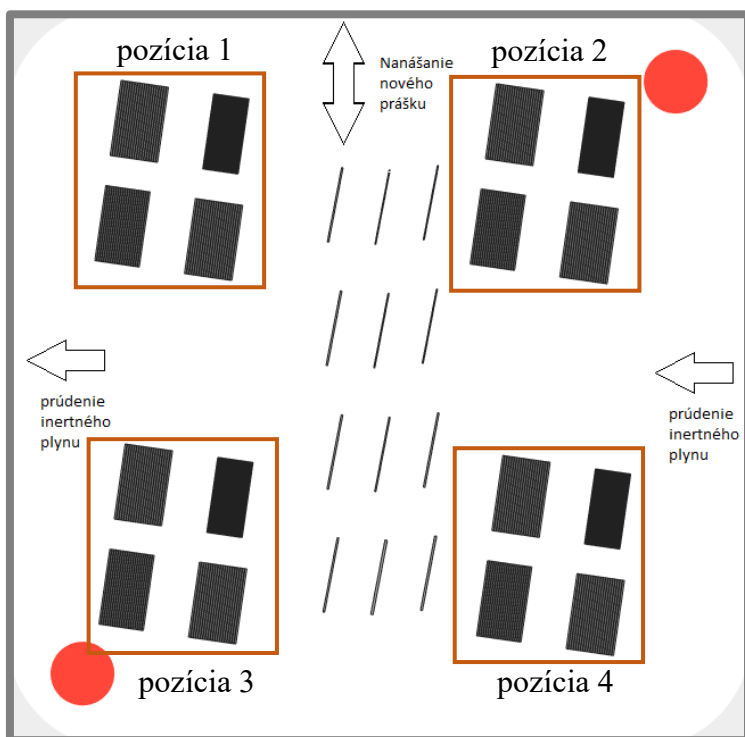


Obr.42 Rozloženie zoskupenia sád stien

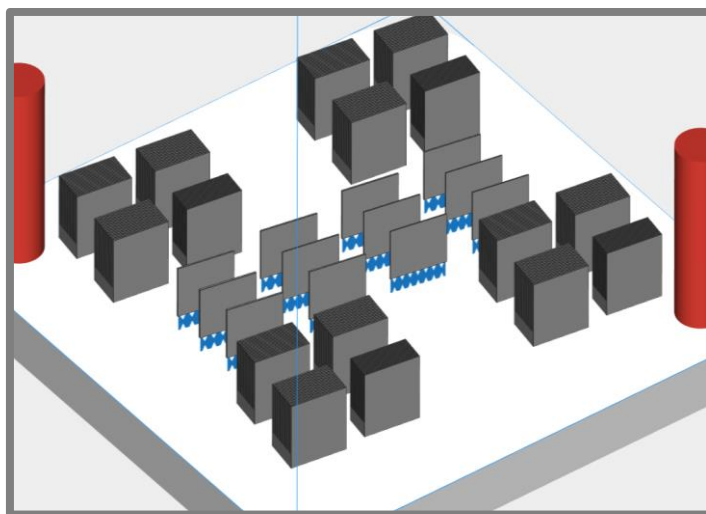
#### 5.2.2 Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme

Rovnako ako pri všetkých experimentoch, aj počas tejto stavby boli všetky vzorky pootočené o 95° voči nanášaciemu britu. V strede stavebnej platformy sa nachádzali

vzorky 12 kolmých stien. Na ostatnej ploche boli umiestnené v rohových častiach vzorky 20 stien, ktoré tvorili 4 zoskupenia, posunutých navzájom o 50 mm.



Obr.43 Rozloženie vzoriek na platforme s označenými pozíciami



Obr.44 Rozloženie vzoriek na platforme

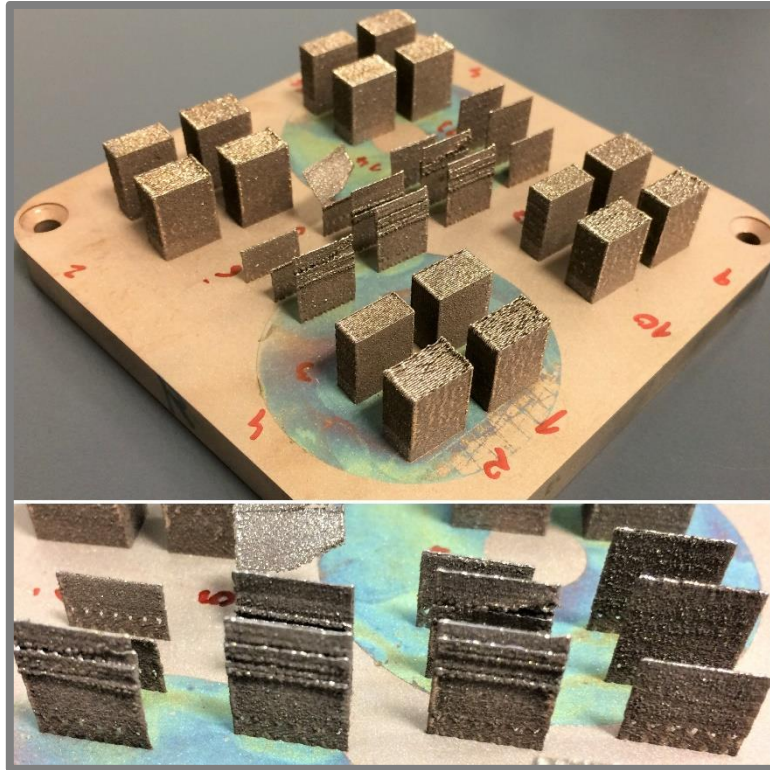
### 5.2.3 Analýza samostatných kolmých stien

Na Obr.45 je zobrazená stavebná platforma bezprostredne po stavbe. Hneď na prvý pohľad je zrejmé, že jednoduché tenké steny situované v strednej časti neboli vyrobené podľa očakávania. Kompletne bez nejakých väčších defektov sa podarilo opätovne postaviť len 2 steny z 12-skupiny procesných parametrov 11 a 12. Pri ostatných stenách sa začali počas stavby objavovať nekvalitné návary, ktoré spôsobili v prípade 5 stien úplné oddelenie a odpadnutie väčšiny objemu. Pri zvyšných vzorkách boli patrné väčšie trhliny, čiastočné oddelenie vrchnej polovice od spodnej,

5.2.3



prípadne natavenie výraznejšieho množstva prášku na povrchu. Na základe spomenutých skutočností nebola na jednoduchých tenkostenných vzorkách vytvorená žiadna analýza. Všetky steny boli znova zahrnuté do nasledujúcej stavby, kedy boli opäť postavené za cieľom overenia týchto výsledkov.



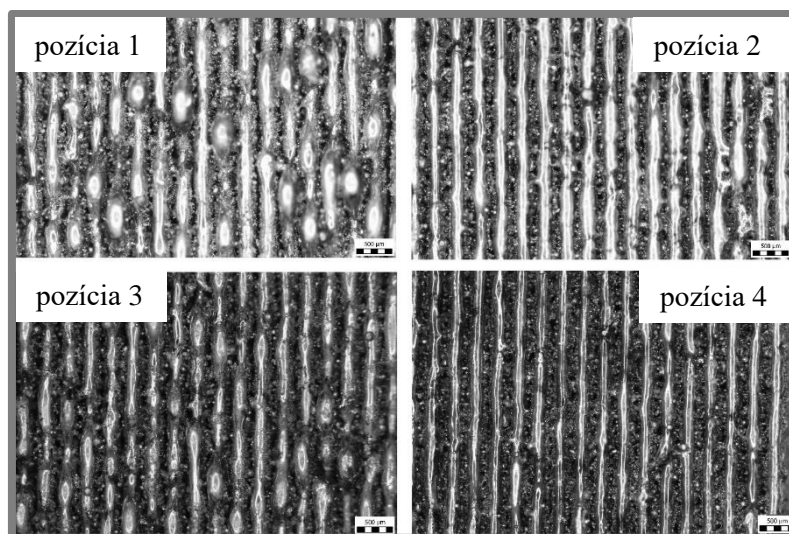
Obr.45 Stavebná platforma so vzorkami hneď po stavbe

### 5.2.4 Analýza sady 20 tenkých kolmých stien hneď po stavbe

Z Obr.45 je zrejme, že stavba sady 20 stien prebehla úspešne v porovnaní s jednoduchými stenami. Všetky vzorky boli postavené bez väčších defektov.

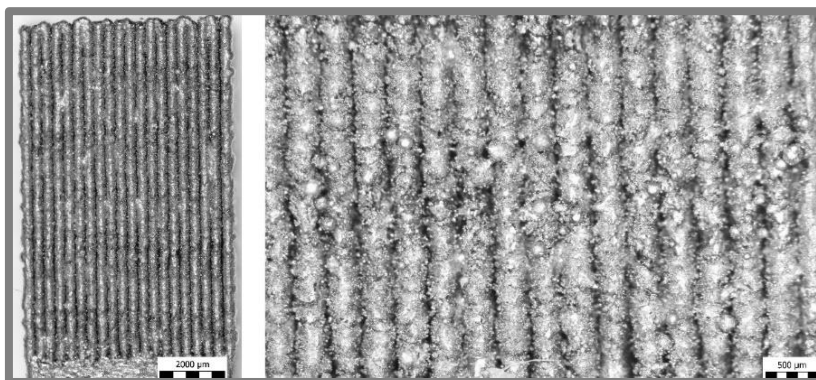
### 5.2.5 Analýza posledného návaru sady 20 kolmých stien

Pri pohľade na posledný návar je možné pozorovať pri väčšine stien minimum defektov. Najčastejšie je viditeľné prerušenie kontinuity návaru na krátku vzdialenosť. Na vytvorených snímkoch Obr.46 je patrný vplyv polohy vzoriek na stavebnej platforme. Vzorky nachádzajúce sa pri vstupe inertného plynu do stavebnej komory obsahujú menšie množstvo defektov. Na Obr.46 je zobrazená sada stien vytvorená skupinou procesných parametrov 1. Obrázky sú zobrazené v rovnakom poradí, ako sa nachádzali počas stavby na platforme. Podobný trend zmeny kvality posledného návaru bolo možné sledovať pri všetkých 4 skupinách testovaných parametrov.



Obr.46 Pohľad na sadu 20 stien postavenú skupinou proc. parametrov 1 v rôznych polohách na platforme ( $lp=400$  W,  $ss=900$  mm/s,  $hd=1$   $\mu$ m)

Pri pohľade na vzorky z boku kolmo na smer stavby je zrejmé, že pri všetkých sadách stien dochádzalo k ich prepojeniu v dôsledku malej vzdialenosti medzi jednotlivými stenami. Na základe výsledkov získaných v prvom experimente boli navrhnuté medzery medzi jednotlivými stenami na  $100\mu$ m. Podľa očakávania tento test poukázal na rozdielnu distribúciu tepla počas stavby v porovnaní so samostatnými stenami. V dôsledku zvýšenia množstva dodávanej energie spôsobeného hustou koncentráciou stien nedochádza k dostatočnej dobe na chladnutie taveniny, nastáva prehriatie danej oblasti, čo následne spôsobuje natavenie väčšieho množstva kovového prášku a väčšie rozmery stien. Tento výsledok spôsobil pri všetkých sadách vymedzenie vôle medzi stenami a na viacerých miestach došlo k ich prepojeniu (Obr.47).

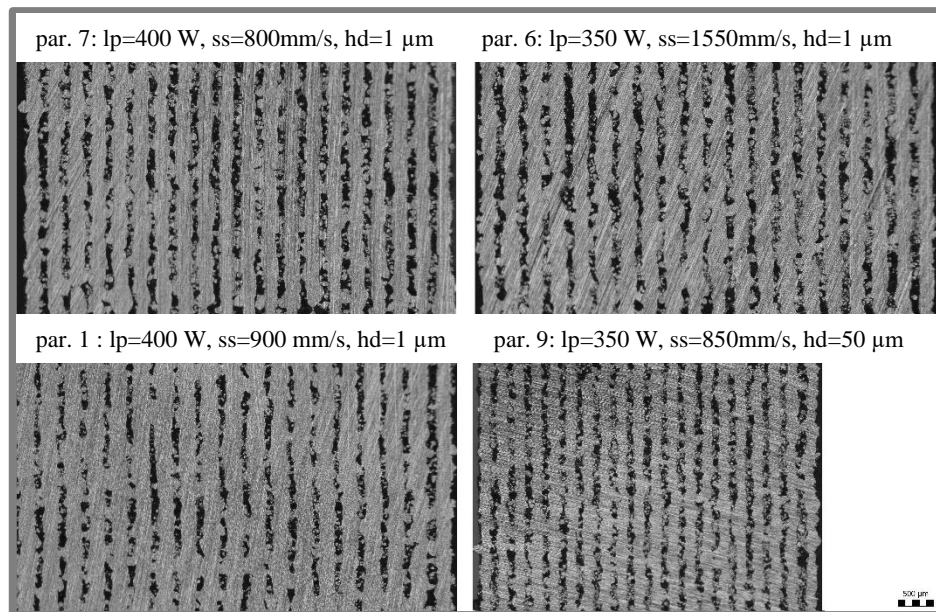


Obr.47 Bočný pohľad na sadu 20 stien postavenú skupinou procesných parametrov 7 (pozícia 1,  $lp=400$  W,  $ss=800$  mm/s,  $hd=1$   $\mu$ m)

### 5.2.6 Analýza výbrusov sady 20 kolmých stien

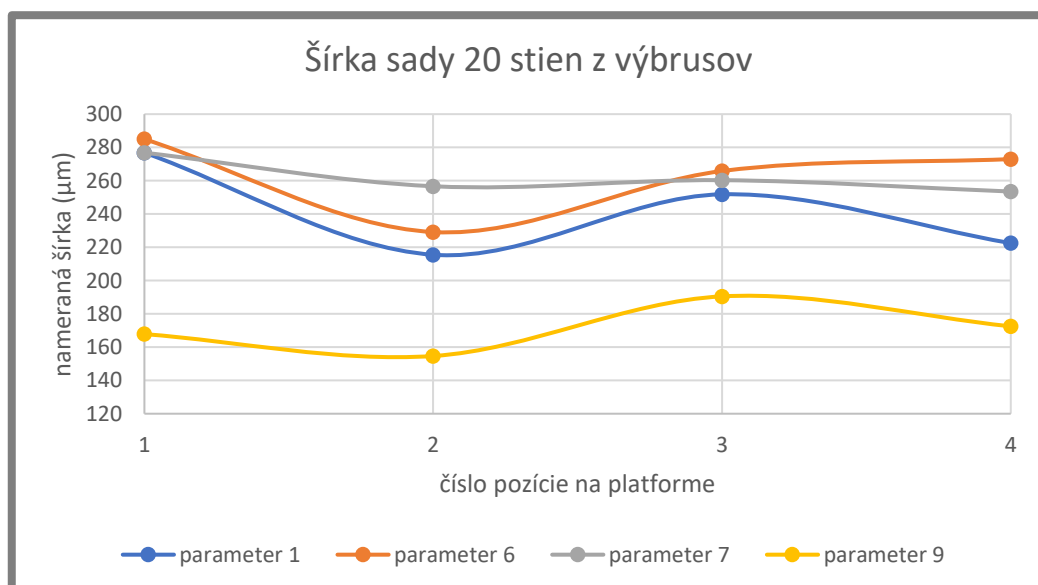
Na všetkých vzorkách boli vytvorené metalografické výbrusy a pomocou mikroskopu bola zmeraná ich šírka. Výsledné hodnoty širok jednotlivých stien boli vytvorené priemerom 6 nameraných hodnôt. Podľa očakávania na základe predchádzajúcej analýzy na vzorkách bolo viditeľné veľké množstvo defektov spôsobené nedostatočnou vôľou medzi stenami. Na mnohých miestach došlo počas stavby k prepojeniu jednotlivých stien (Obr.48). V priestoroch medzi stenami je vidieť veľké

množstvo zachyteného prášku. Na Obr.48 sú zobrazené vytvorené snímky na 4 vzorkách postavených 4 rozličnými skupinami parametrov umiestnených v pravom hornom rohu platformy (pozícia 2).



Obr.48 Pohľad na veľké množstvo defektov na výbrusoch 4 sád 20 stien umiestnených na pozícií 2

Namerané priemerné hodnoty širok stien sú zobrazené na Obr.49. Každá krivka reprezentuje jednu skupinu použitých procesných parametrov. Hodnoty na osi x reprezentujú pozície zobrazené na Obr.43. Z tvaru kriviek je patrný už spomenutý trend, ktorý naznačuje vplyv polohy vzorky na platforme. Pozície bližšie ku vstupu inertného plynu do stavebnej komory (2, 4) dosahujú užšie vytvorené steny v porovnaní so vzorkami situovanými pri jeho výstupe z komory (1, 3).

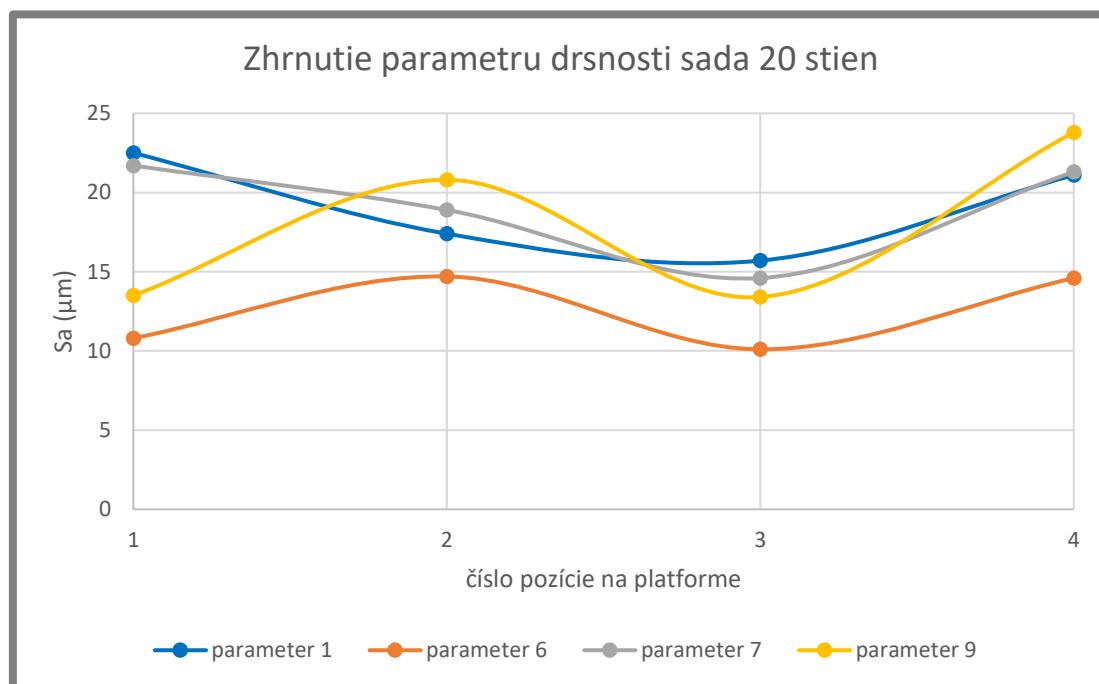


Obr.49 Závislosť šírky stien na pozícií na platforme (proc. parametre 1, 6, 7, 9)



### 5.2.7 Vyhodnotenie drsnosti sady 20 kolmých stien

Analýza drsnosti bola vytvorená na vonkajšej ploche krajnej steny. Z tvaru kriviek zobrazených na Obr.50 je viditeľná závislosť drsnosti stien na ich polohe na stavebnej platforme. Je patrné, že vzorky umiestnené bližšie k vstupu inerného plynu do komory dosahujú horšie hodnoty drsnosti, priemerne o 4-8 $\mu\text{m}$ . V porovnaní so samostatnými stenami v prvom experimente došlo k výraznejšiemu nárastu drsnosti práve pri týchto vzorkách.



Obr.50 Závislosť parametru drsnosti na pozícií na platforme (proc. parametre 1, 6, 7, 9)

### 5.2.8 Zhrnutie výsledkov druhého experimentu

Druhý experiment pozostával z 12 samostatných kolmých stien a 16 vzoriek obsahujúcich sady 20 kolmých stien vzdialených od seba 100 $\mu\text{m}$ . Každá samostatná stena bola postavená jednou skupinou procesných parametrov určených na základe prvého experimentu tejto práce. Samotná stavba prebehla bez komplikácií. Hneď po vybratí vzoriek zo zariadenia SLM bolo pozorovateľné na samostatných stenách veľké množstvo nedostatkov. V prípade 5 stien došlo k ich narušeniu a oddeleniu väčšej časti. Ďalších 5 vzoriek obsahovalo veľké množstvo defektov, ako je natavený prášok na povrchu a veľké dutiny narušujúce spojitosť vzoriek. V tomto teste sa podarilo postaviť len 2 kvalitné steny. Na základe týchto výsledkov neboli na vzorkách vyhodnocované žiadne analýzy a ich stavba sa zopakuje v ďalšom experimente. Druhá časť obsahujúca sady 20 kolmých stien dopadla v porovnaní so samostatnými stenami dobre. Sady stien boli umiestnené po 4 v rohových oblastiach stavebnej platformy, dohromady 16. V každom zoskupení boli jednotlivé vzorky postavené procesnými parametrami 1, 6, 7, 9. Toto usporiadanie bolo vytvorené za cieľom overenia vplyvu polohy vzoriek na stavebnej platforme na ich výslednej kvalite. Podľa očakávania bola preukázaná rozdielna distribúcia tepla vo vzorkách s väčšou hustotou tenkých stien. V dôsledku väčšej hustoty stien bolo privedené do vzoriek väčšie množstvo energie. To spôsobilo prehriatie väčšej oblasti a roztavenie väčšieho množstva prášku. Pri takmer všetkých vzorkách bolo viditeľné aj výrazné prepojenia stien. Taktiež bol

dokázaný vplyv polohy vzoriek na platforme. Vzorky nachádzajúce sa na strane vstupu inertného plynu do stavebnej komory vykazovali tenšie steny, kvalitnejšie návary a väčšiu drsnosť povrchu. K zhoršeniu drnlosti povrchu dochádzalo pri vzorkách na opačnej strane platformy priemerne o 4-8  $\mu\text{m}$ . Tento test bude v ďalšej časti zopakovaný, kedy bude vzdialenosť medzi stenami zvýšená, aby nedochádzalo k ich prepojeniu.

---

### 5.3 Test tenkých stien 3

Nasledujúci experiment nadviazal na predchádzajúci test, kedy boli opäť postavené vzorky samostatných kolmých stien, ktorých stavba neprebehla úspešne. Do experimentu boli zahrnuté modifikované sady stien.

---

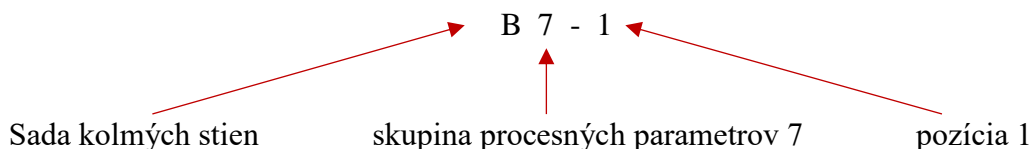
#### 5.3.1 Príprava a popis experimentu 3

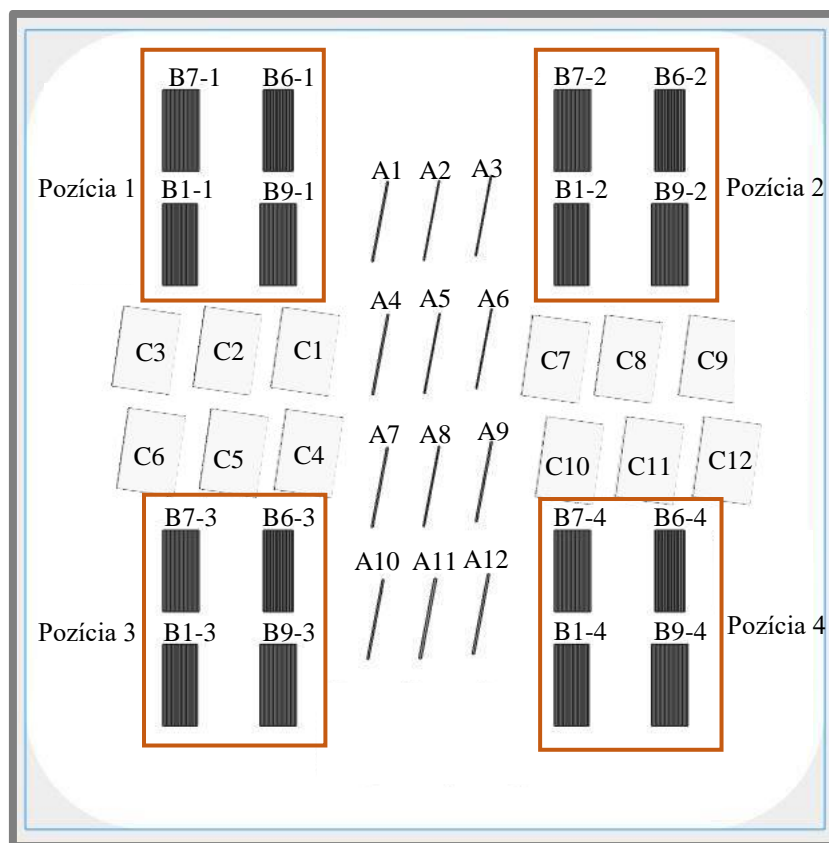
Vytvorené sady obsahovali 10 kolmých stien vzdialených 400 $\mu\text{m}$ . Všetky sady stien boli opäť postavené 4x v rohových oblastiach stavebnej platformy vzdialených 50 mm za cieľom overenia vplyvu polohy vzoriek na stavebnej platforme. V porovnaní s predchádzajúcim experimentom boli použité na stavbu dve platformy, kedy bolo postavených 48 (12 skupín procesných parametrov x 4 pozície na platforme = 48) sád tenkých stien. Cieľom bolo overiť všetkých 12 skupín procesných parametrov na vzorkách obsahujúcich väčšiu hustotu tenkých stien, ktoré sa v praxi bežne vyskytujú.

---

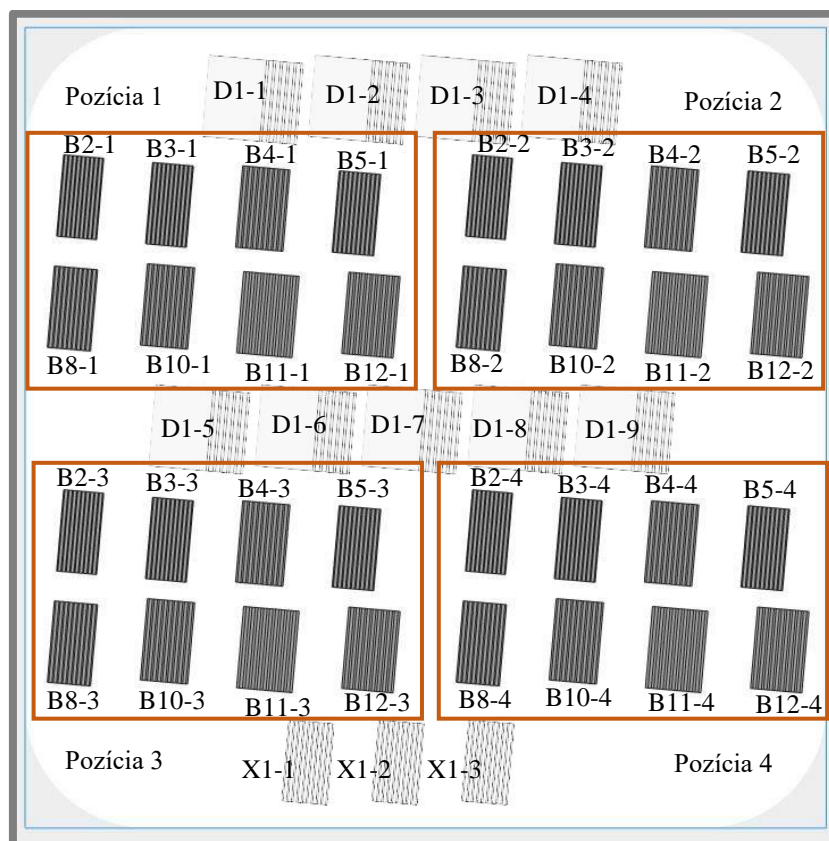
#### 5.3.2 Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme

Rovnako ako v predchádzajúcom teste, bolo na jednej platforme uložených v strednej oblasti 12 vzoriek samostatných kolmých stien stavaných 12 skupinami procesných parametrov (Tab.11). V experimente boli použité **2 platformy**. V rohových oblastiach **prvej** platformy boli umiestnené zoskupenia 4 sád stien (podobne ako v kapitole 5.2.2.) stavaných skupinami procesných parametrov 1, 6, 7, 9 t). Ostatné vzorky boli rovnako postavené 4x na **druhej** platforme, kedy ich rozloženie bolo obdobné, ako v prípade prvej platformy. Na jednotlivých (rohových) pozíciách boli vytvorené 4 zoskupenia každé obsahujúce 8 vzoriek stavaných inou skupinou procesných parametrov. Na Obr.51 a Obr.52 sú zobrazené obe platformy, kde sú zvýraznené červeným rámkom kolmé vzorky. Pre lepšiu orientáciu bolo vytvorené značenie vzoriek, kde písmeno znanemá typ vzorky (A-samostatné kolmé steny, B-sady kolmých stien. C-steny pod uhlom 45°, D-sady stien pod uhlom 45° s použitým parametrom down skin, X-steny určené na  $\mu\text{Ct}$ , E-sady stien pod uhlom 45°). Číslo hned' za prvým písmenom znamená číslo použitej skupiny parametrov (Tab.11). Druhé číslo za pomlčkou označuje číslo pozície.





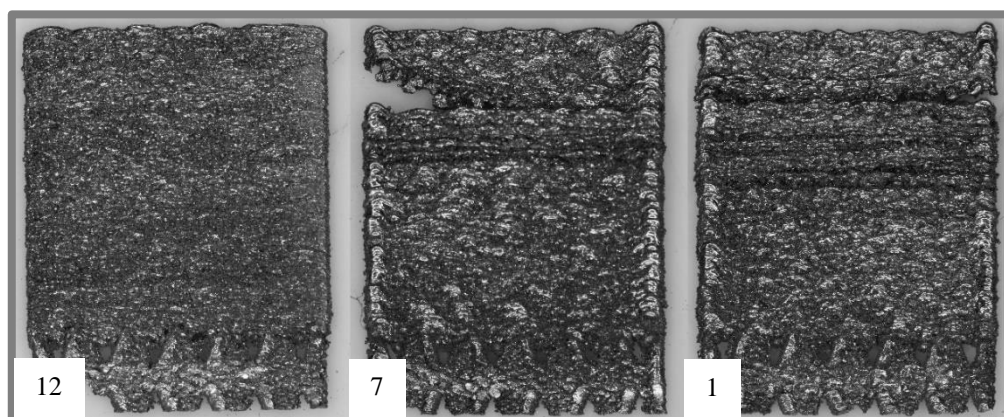
Obr.51 Rozloženie pozícií a vzoriek na stavebnej platforme 1



Obr.52 Rozloženie pozícií a vzoriek na stavebnej platforme 2

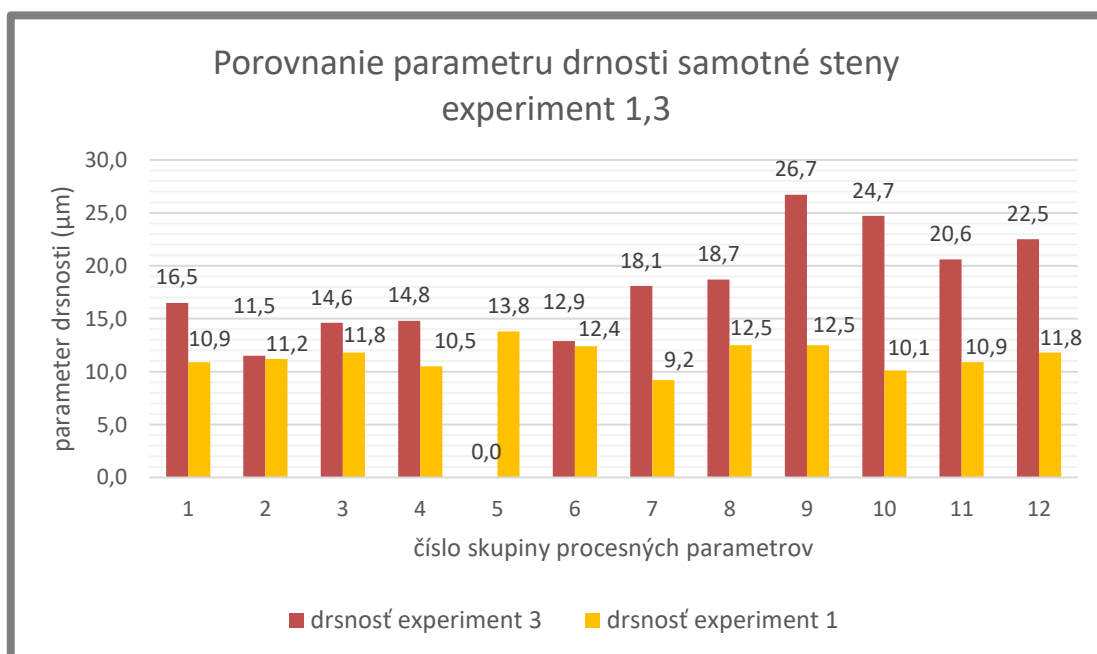
### 5.3.3 Analýza samostatných kolmých stien

Stavba samotných kolmých stien prebehla obdobne ako v predchádzajúcom experimente. Úspešne sa podarilo postaviť len 2 steny (skupina procesných parametrov 11, 12 (Tab.11)). Všetky ostatné steny obsahovali cca od 6 do 11 mm stavby nespojité návary, ktoré v niektorých prípadoch spôsobili úplne oddelenie väčšiny stien. Vzorka stavaná skupinou procesných parametrov 5 sa kompletne rozpadla hneď po stavbe. Na Obr.53 sú zobrazené niektoré steny.



Obr.53 Samostatné kolmé steny (A12:  $l_p=400$  W,  $ss=800$  mm/s,  $hd=120$   $\mu$ m, A7:  $l_p=400$  W,  $ss=800$  mm/s,  $hd=1$   $\mu$ m, A1:  $l_p=400$  W,  $ss=900$  mm/s,  $hd=1$   $\mu$ m)

Napriek spomenutým problémom boli vzorky analyzované pomocou profilometru na povrchu bez defektov. Výsledný priebeh drsnosti je zobrazený na Obr.54, kde sú získané hodnoty porovnané s hodnotami získanými v prvom experimente. Na prvý pohľad je očividné, že došlo k zhoršeniu kvality povrchu pri takmer všetkých stenách. Najvýraznejšia zmena nastala pri skupine procesných parametrov 7, 8, 9, 10, 11, 12, kde nastalo takmer zdvojnásobenie výsledných hodnôt (Tab.11).



Obr.54 Porovnanie parametru drsnosti samostatné steny experiment 1, 3

### 5.3.4 Analýza sád 10 stien hneď po stavbe

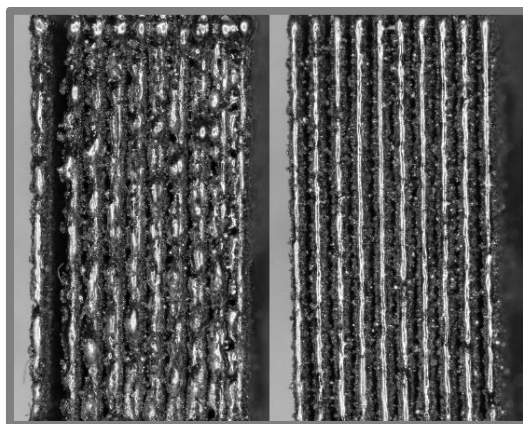
5.3.4

Hneď po stavbe boli viditeľné na viacerých vzorkách nedokonalosti. Podobne, ako pri samostatných stenách dochádzalo pri vzorkách stavaných skupinami procesných parametrov 2, 3, 5, 6, 8 k nerušeniu kontinuity stien (Tab.11).

### 5.3.5 Analýza posledného návaru sady 10 stien experiment 3

5.3.5

Pri pohľade na posledný návar vzoriek obsahujúcich 10 tenkých stien sú viditeľné pri takmer všetkých vzorkách kvalitné neprerušené návary. Pri jednej vzorke stavanou 1. skupinou procesných parametrov bolo vidieť menšie nespojitosti návary. V ďalšej časti sa ukázalo, že v tomto prípade nastalo malé prepojenie poslednej vrstvy (Obr.55).

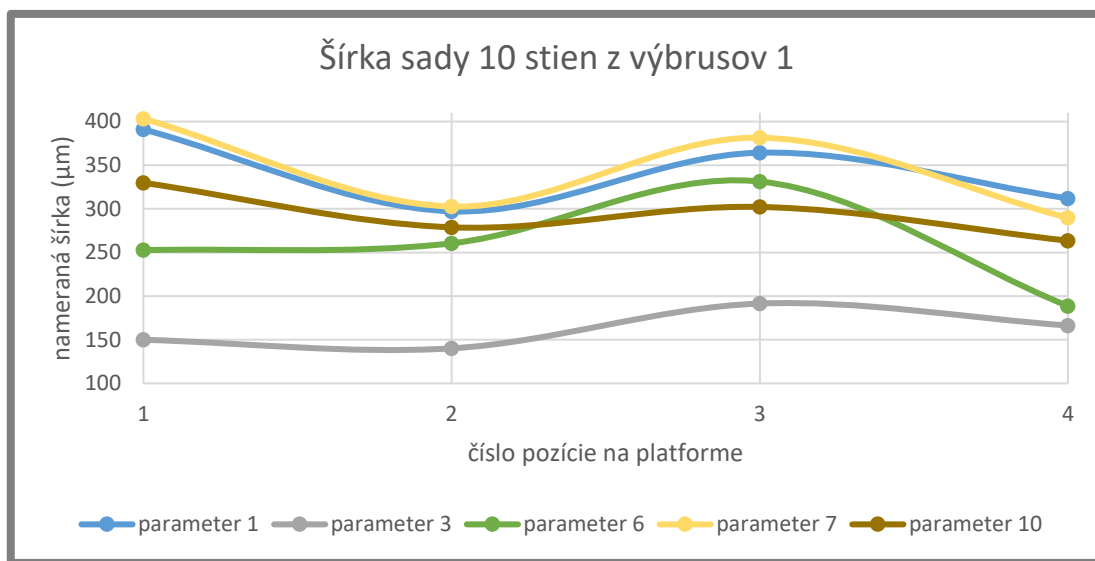


Obr.55 Horný pohľad na sadu 10 stien B1-1, B1-4  
( $I_p=400$  W,  $ss=900$  mm/s,  $hd=1$ )

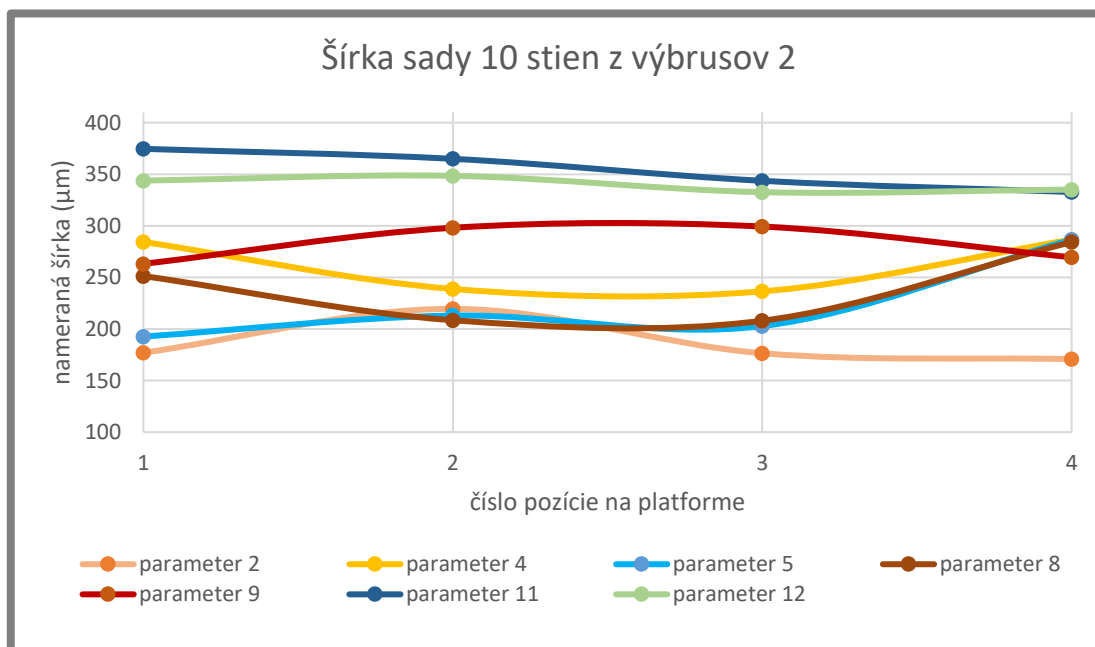
### 5.3.6 Analýza výbrusov sady 10 kolmých stien

5.3.6

V porovnaní s predchádzajúcim testom nastalo rozšírením medzier medzi stenami k významnému zlepšeniu. Na všetkých vzorkách boli vytvorené metalografické výbrusy, pomocou ktorých boli zmerané šírky viacerých stien v reze. Výsledná hodnota vznikla priemerom 6 nameraných hodnôt. Priemerné šírky stien vzoriek zobrazených na Obr.56 vykazujú opakujúci sa trend ich závislosti na polohe na stavebnej platforme. Vzorky postavené skupinami procesných parametrov 1, 3, 6, 7, 10 umiestnené bližšie ku vstupu inertného plynu do stavebnej komory (pozícia 2, 4) vykazujú užšie konečné rozmery v porovnaní so vzorkami postavenými tými istými parametrami umiestnenými na opačnej strane platformy. Vzorky 11, 12 vykazovali len minimálnu závislosť na polohe na platforme. Priebeh závislosti ostatných kriviek môžete vidieť na Obr.57.



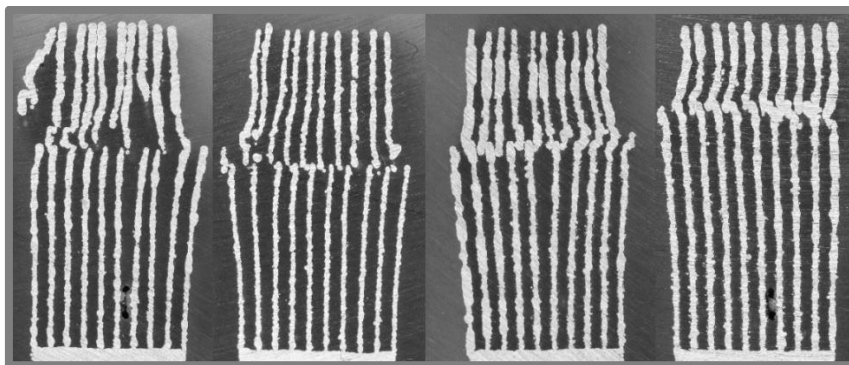
Obr.56 Priebeh šírky sád 10 stien 1-proc. parametre 1, 3, 6, 7, 10



Obr.57 Priebeh šírky sád 10 stien 2-proc. parametre 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12

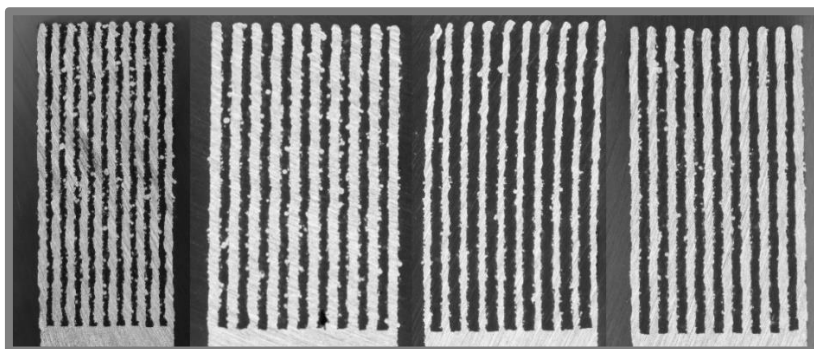
Pri prvom pohľade na sady stien hneď po stavbe bolo vidieť na viacerých stenách defekty. Pri pohľade na metalografické výbrusy sa tieto defekty povrdzujú pri 5 skupinách procesných parametrov, konkrétne 2, 3, 5, 6, 8 (Tab.11). Pri vzorkách dochádza k ich takme úplnému rozpadnutiu približne po polovici stavby a vybočení stien zo stredu do strán. Po dosiahnutí limitného stavu došlo k oddeleniu nových vytvorených vrstiev, ktoré sa čiastočne prichytili už k vytvoreným vzorkám, alebo boli postavené do čistého kovového prášku. Tento jav je pozorovaný na Obr.58. Všetky steny tohto typu sú zobrazené v prílohe 5 s označeným umiestnením na platforme.





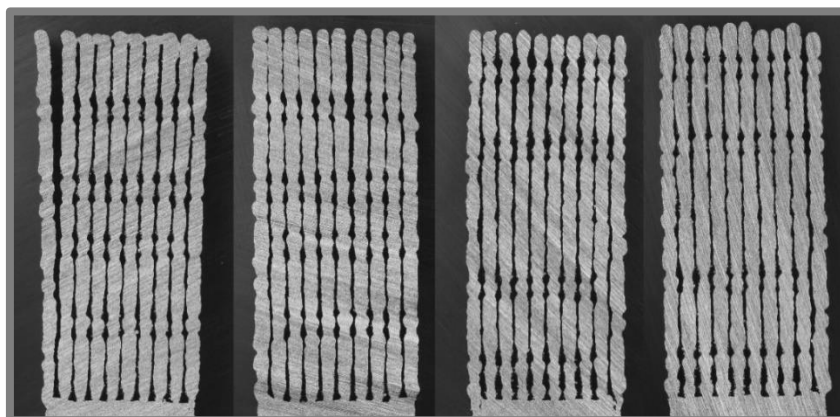
Obr.58 Defekt oddelených stien (vzorky B2-1, B3-1, B2-2, B5-1)

Ďalší typ vzoriek, ktoré sa vyskytovali po stavbe obsahovali kvalitné kontinuálne steny bez väčších defektov. Na snímkach je iba zobrazené menšie množstvo nasintrovaného kovového prášku na povrchu stien. Obr. 59. Tieto vzorky boli postavené skupinami procesných parametrov 9, 10, 11, 12 (Tab.11) Všetky steny tohto typu sú zobrazené v prílohe 6 s označeným umiestnením na platforme.



Obr. 59 Viditeľné väčšie množstvo nasintrovaného prášku (vzorky B9-4, B12-2,

Posledný typ vzoriek, ktoré boli vytvorené v tomto teste obsahovali kvalitné steny takmer bez žiadneho nasintrovaného kovového prášku alebo väčších defektov. Tieto kvalitné steny boli vytvorené pomocou skupiny procesných parametrov 1, 7, čiastočne aj 4 a 9 (Tab.11). Na Obr.60 sú zobrazené steny 1 a 7 (Tab.11). Pri týchto stenách bolo možné sledovať najvýraznejšie opakujúce sa krátke zúženie stien. Všetky steny tohto typu sú zobrazené v prílohe 7 s označeným umiestnením na platforme.

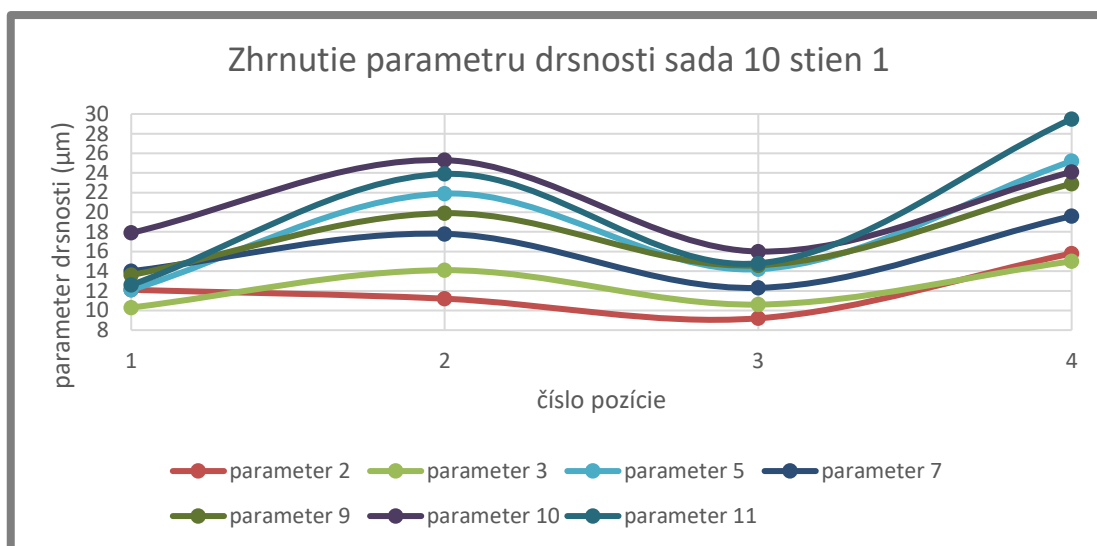


Obr.60 Vzorky bez defektov (vzorky B1-1, B1-2, B1-3, B7-3)

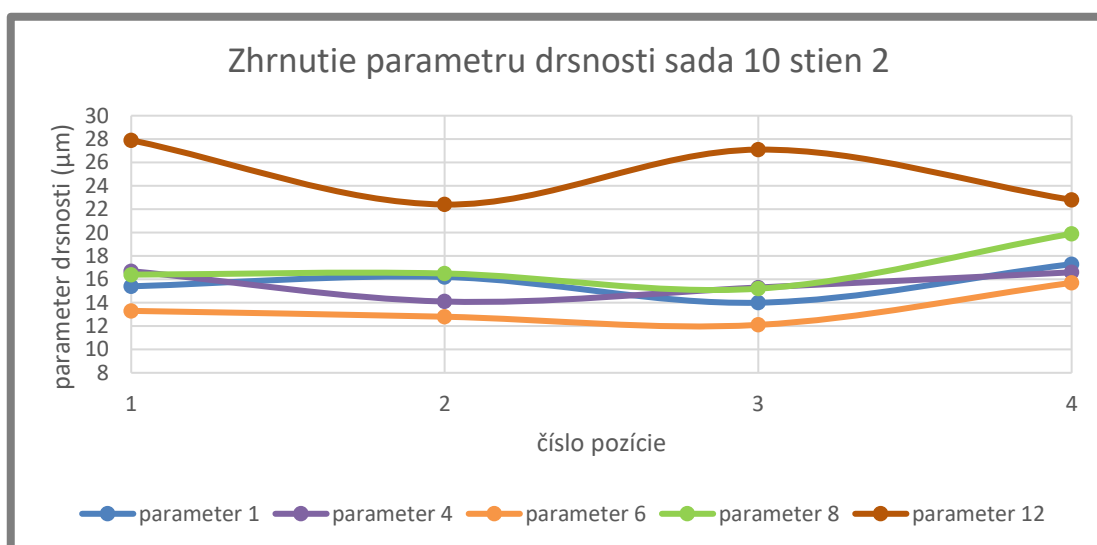


### 5.3.7 Vyhodnotenie parametru drsnosti sady 10 stien

Pri analýze kvality povrchu je opäť pri viacerých vzorkách možné pozorovať závislosť na ich polohe na platforme. Pre lepšiu vizualizáciu boli vzorky rozdelené do dvoch grafov. Vzorky so závislosťou na polohe sú zobrazené na Obr.61. Skupiny parametrov 2 a 3 (Tab.11) vykazujú len miernu závislosť, kedy sa hodnoty medzi maximálnou a minimálnou hodnotou drsnosti pohybujú v rozpätí 9,2 a 15,8  $\mu\text{m}$ . Ostatné vzorky stavanými skupinami procesných parametrov 5, 7, 9, 10, 11 (Tab.11) vykazujú rozdiel medzi jednotlivými polohami približne o 8 až 15  $\mu\text{m}$ . Na ostatných vzorkách na Obr.62 boli namerané hodnoty takmer nemenné vo všetkých pozíciách na stavebnej platforme okrem skupiny procesných parametrov 12 (Tab.11), pomocou ktorej bol priebeh parametru drsnosti opačný ako pri prvej časti vzoriek zobrazených Obr.61. Rozdiel medzi pravou a ľavou stranou stavebnej platformy pri parametroch 12 sa pohybuje okolo 5  $\mu\text{m}$ . Namerané hodnoty parametru drsnosti sa pohybujú v rozpätí od 9,2 do 29,5  $\mu\text{m}$ .



Obr.61 Zhrnutie parametru drsnosti sada 10 stien 1



Obr.62 Zhrnutie parametru drsnosti sada 10 stien 1

### 5.3.8 Zhrnutie výsledkov tretieho experimentu

Tretí experiment bol podobný predchádzajúcemu, teda druhému, kedy boli do stavby zahrnuté opäť samotné kolmé steny postavené 12 skupinami procesných parametrov (Tab.11). V tomto teste boli kvalitne postavené len 2 vzorky z 12. Pri ostatných sa objavovalo veľké množstvo defektov a pri väčšine nastalo úplne rozpadnutie stien. Opakovanie experimentu malo overiť, či sa budú tieto výsledky duplikovať. Hneď po stavbe boli viditeľné opäť pri 10 z 12 vzoriek už skôr spomenuté defekty, kedy dochádzalo k rozpadnutiu vzoriek. Vzorky, ktoré boli stavané 3x vždy v rovnakých podmienkach, ukázali v 2 prípadoch, že pri väčšine z nich sa začnu vyskytovať približne v polovici stavby výrazné defekty. Opakovane sa podarilo pri všetkých testoch vytvoriť jedine steny stavané skupinami procesných parametrov 11 a 12 (Tab.11). Tieto vzorky boli postavené výkon lasera 400W a malými skenovacími rýchlosťami 850 a 800W. Od ostatných 10 vzoriek sa odlišovali väčším odsadením trajektórií lasera, konkrétne 100 a 50  $\mu\text{m}$ . Pravdepodobne táto skutočnosť zabezpečila pri väčšej výške stien ich stabilitu a spôsobila, že ich stavba prebehla úspešne. Pri poslednom treťom experimente bol patrný aj nárast drsnosti pri vzorkách stavaných procesnými parametrami 7, 8, 9, 10, 11, 12 v porovnaní s výsledkami prvého experimentu (Tab.11). Hodnota drsnosti pri týchto vzorkách stúpala na dvojnásobok.

V tomto experimente boli postavené taktiež modifikované sady 10 stien. Vzorky obsahovali 10 kolmých stien vzdialených od seba 400 $\mu\text{m}$ . Všetky sady boli postavené pomocou 12 skupín procesných parametrov 4x, kedy boli rozdelené do 4 zoskupení vzoriek. Každé jedno zoskupenie bolo umiestnené v rohovej oblasti platformy. *Tak bola postavená vzorka každou skupinou procesných parametrov v každej rohovej oblasti stavebnej platformy.* Týmto viacnásobným rozložením bolo možné overiť opakovateľnosť stavby na 4 nezávislých vzorkách. Rovnako bol daný test zameraný na overenie vplyvu polohy na stavebnej platforme. Pri pohľade na vzorky hneď po stavbe boli viditeľné defekty na mnohých stenách. Vytvorené vzorky je možné rozdeliť do 3 kategórií. Prvá, do ktorej spadajú vzorky obsahujúce prerušenie kontinuity steny. Tieto vady sa opakovali pri 19 z 20 vzoriek stavaných skupinami procesných parametrov 2, 3, 5, 6, 8 (Tab.11). Pri týchto vzorkách bolo možné vidieť zdeformovanie stien, kedy jednotlivé steny vybočovali zo stredu so strán. Druhú kategóriu tvorili sady stien, ktorých stavba prebehla úspešne, no na povrchu vzoriek sa vyskytovalo väčšie množstvo nasintrovaného kovového prášku. Tento prášok v niektorých prípadoch výraznejšie spôsoboval zúženie priestoru medzi stenami. Posledná tretia kategória stien boli vzorky stavané skupinami procesných parametrov 1, 4, 7, 9 (Tab.11), ktoré na výbrusoch nevykazovali takmer žiaden nasintrovaný prášok. Povrch ako aj objem týchto vzoriek sa javil byť takmer bez defektov. Pri všetkých sadách, najvýraznejšie na sadách tretej kategórie, boli viditeľné oblasti krátkeho zúženia opakujúce sa takmer pravidelne v priebehu stavby. Z metalografických výbrusov bola vyhodnotená šírka všetkých sád stien. Jednotlivé hodnoty boli analyzované s ohľadom na pozíciu danej vzorky na stavebnej platforme. V tejto časti boli viditeľne dve skupiny vzoriek. V prvej boli vzorky stavané procesnými parametrami 1, 3, 6, 7, 10 (Tab.11). Tie vykazovali závilosti na polohe, kedy vzorky umiestnené bližšie k vstupu inertného plynu do stavebnej komory dosahovali menšie rozmery o 50 – 100  $\mu\text{m}$  v porovnaní so vzorkami na opačnej strane platformy. Steny stavané skupinami procesných parametrov 11 a 12 nevykazovali takmer žiadnu zmenu šírky stien (Tab.11). Pri analýze drsností povrchu boli opäť

viditeľné skupiny vzoriek, ktorých drsnosť sa menila v závislosti na polohe. Konkrétne vzorky stavané skupinami procesných parametrov 5, 7, 9, 10, 11 (Tab.11) sa vyznačujú vyššou závislosťou na polohe, kedy rozdiel medzi pravou (pozícia 2, 4) a ľavou stranou (pozícia 1, 3) sa pohybuje okolo 8 – 15µm. Ostatné skupiny procesných parametrov, okrem 12, nevykazujú výraznejšiu zmenu parametru drsnosti. Na vzorkách postavenými skupinou parametrov 12 bolo možné sledovať opačný trend závislosti, kedy vzorky umiestnené pri vstupe inertného plynu do stavebnej komory vykazujú nižšie hodnoty drsnosti priemerne o 5µm. Všetky namerané hodnoty parametru drsnosti sa pohybovali v rozpätí od 9,2 do 29,5µm

Najlepšie výsledky boli dosiahnuté práve vzorkami stavanými skupinami procesných parametrov 1, 4, 7, 9. V Tab.12 sú zobrazené procesné parametre a namerané hodnoty pre jednotlivé vzorky. Všetky snímky výbrusov sú priložené v prílohe 8.

Tab.12 Výpis procesných parametrov pre dobré výsledky sad 10 kolmých stien

č. parametru	lp (W)	ss (mm/s)	hd (µm)	šírka (µm)	ØSa (µm)
1	400	900	1	300-400	15,7
4	400	850	1	230-280	15,6
7	400	800	1	300-400	15,9
9	350	850	50	260-300	17,8

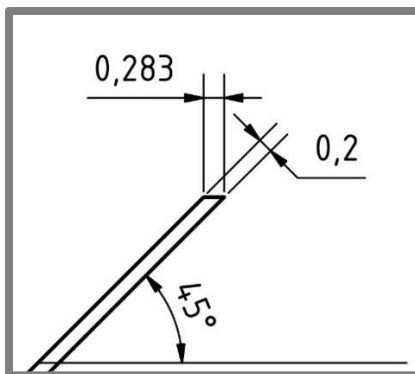
## 5.4 Test steny pod uhlom 45°

Ďalšia časť diplomovej práce bola venovaná tenkým stenám zvierajúcim so stavebnou platformou uhol iný ako 90°. V bežnej praxi nie je vždy možné používať geometriu, ktorá by bola kolmo voči platforme. Za týmto cieľom boli navrhnuté vzorky, ktorých úlohou je objasniť vplyv zmeny stavebného uhlu na výslednú kvalitu stavby. V tomto experimente boli vytvorené primárne vzorky zvierajúce s platformou uhol 45°. Pri použití väčšieho náklonu bude možné sledovať výraznú zmenu výslednej kvality stien, predovšetkým na ich spodnej ploche. V tejto kapitole boli vytvorené vzorky obdobne ako v predchádzajúcich experimentoch. Konkrétne to boli samotné tenké steny a sady viacerých stien. V závere kapitoly bude použitý a overený nový procesný parameter *downskin* (dolná plocha). Všetky vzorky boli samonosné bez prídavných podpor.

### 5.4.1 Príprava a popis experimentu

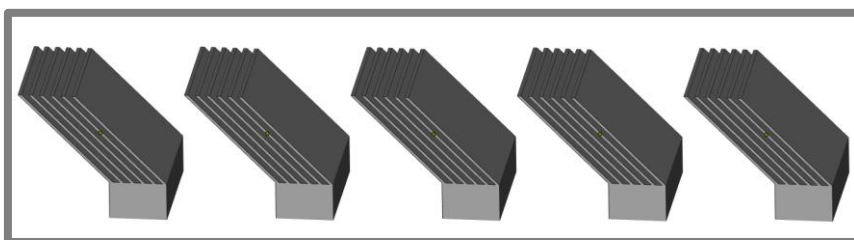
Na stenách pod uhlom 45° bolo testovaných rovnakých 12 skupín procesných parametrov ako v predchádzajúcich experimentoch (Tab.11). Prvá časť bola zameraná na samostatné tenké steny zvierajúce uhol 45° voči stavebnej platforme. Konkrétne bolo postavených 12 vzoriek tohto typu. Cieľom bolo overiť použiteľnosť spomenutých procesných parametrov pri nových podmienkach. Pri zvyšovaní náklonu stien pri zachovaní ich geometrie nastane počas vytvárania jednotlivých rezov stavby zmena voči pôvodným podmienkam. Pri zachovaní pôvodných procesných parametrov, čiže pri rovnakej kompenzácii trajektórie lúča lasera nastavenej na 25µm od okraja použitej geometrie, nastane pri náklone steny v danom reze zväčšenie

skenovanej plochy. Na Obr.63 je zobrazená modelová situácia, obsahujúca stenu širokú  $200\text{ }\mu\text{m}$  postavenú pod uhlom  $45^\circ$ . To má za následok, že pôvodná vzdialenosť trajektórií lúča lasera sa zmení z pôvodných  $150\text{ }\mu\text{m}$  na  $233\text{ }\mu\text{m}$ . Zmena skenovanej plochy má za následok zmenu množstva dodávanej energie do konkrétneho objemu.



Obr.63 Zmena skenovacej plochy pri uhle  $45^\circ$

V experimente boli vytvorené vzorky sád 6 stien stavané taktiež pod uhlom  $45^\circ$  (Obr.64). Kolmá vzdialenosť medzi stenami bola  $400\text{ }\mu\text{m}$ . Spolu bolo vytvorených 12 sád stien každá postavená inou skupinou procesných parametrov.

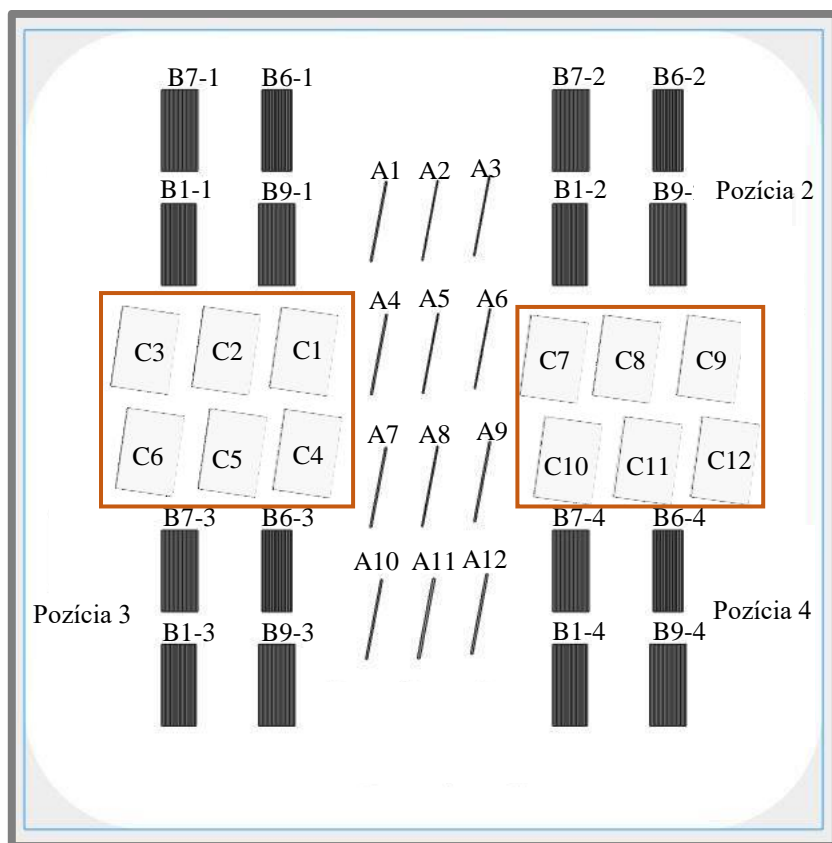


Obr.64 Modely sád 6 stien pod uhlom  $45^\circ$

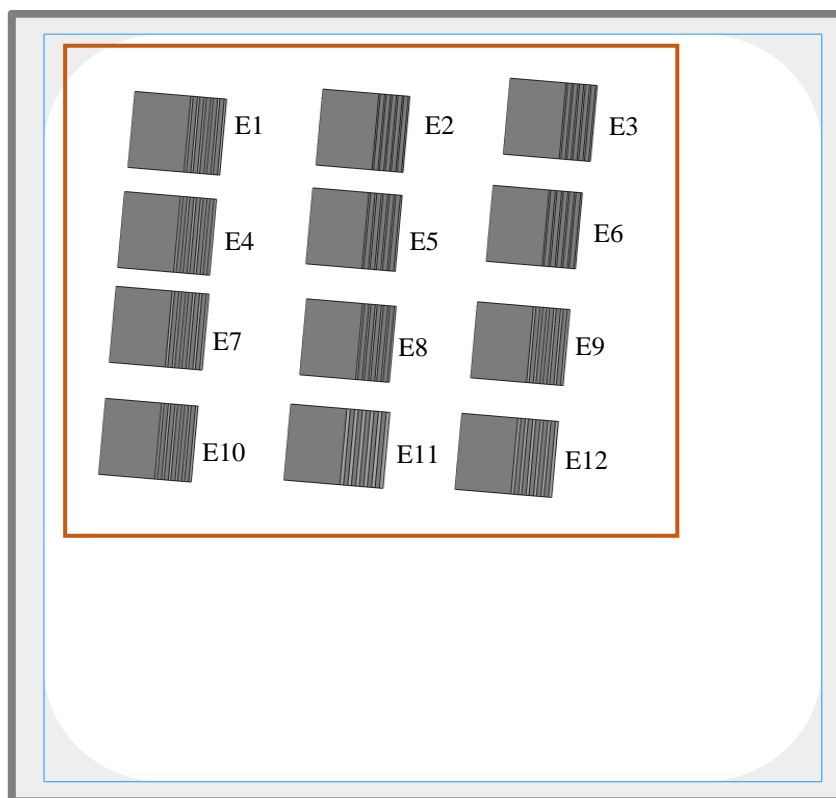
### 5.4.2 Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme

### 5.4.2

Samostatné steny a sady 6 stien pod uhlom  $45^\circ$  boli stavané na 2 platformách. Rozloženie samostatných stien je zobrazené na Obr.65, kedy boli postavené spolu na platforme s kolmými stenami. Ich pozícia je označená písmenom C s číslom príslušnej skupiny procesných parametrov. Vzorky sú zvýranené červeným rámkom pre lepšiu orientáciu. Sady stien sa nachádzali na samostatnej platforme, kedy ich rozloženie je zobrazené na Obr.66. Vzorky sú označené písmenom E a číslom príslušnej skupiny procesných parametrov. Na ostatnej ploche stavebnej platformy boli umiestnené ďalšie vzorky.



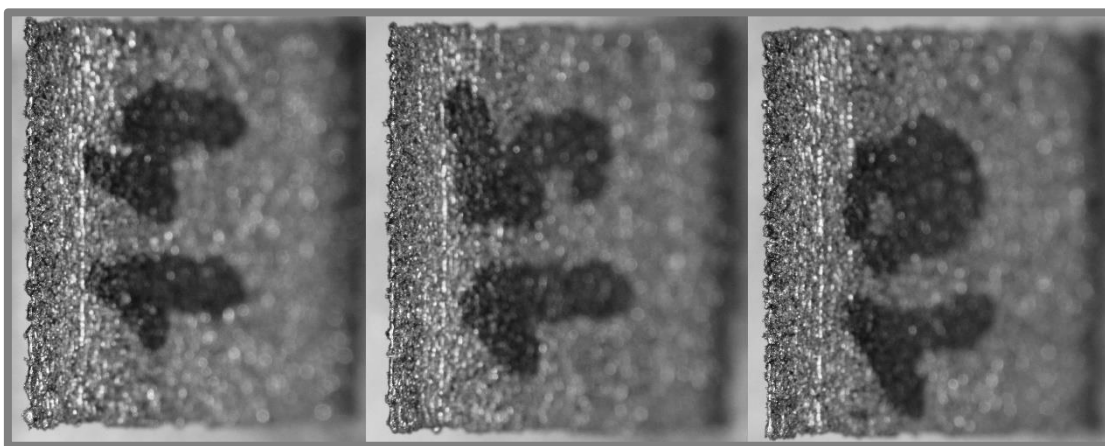
Obr.65 Rozloženie vzoriek na platforme-samostatné steny poh uhlom 45



Obr.66 Rozloženie vzoriek na platforme-sady stien pod uhlom 45°

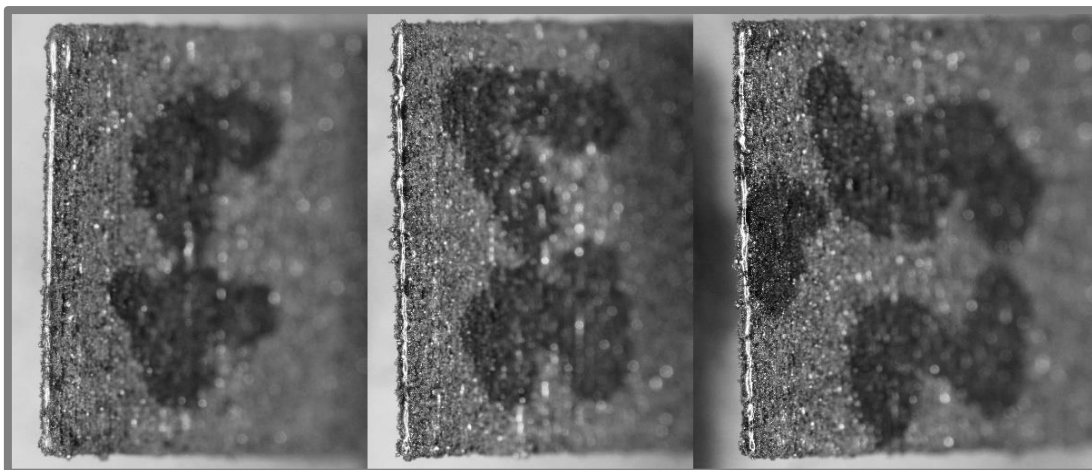
**5.4.3 Analýza posledného návaru samostatných stien pod uhlom 45°**

Stavba prebehla úspešne bez vzniku výrazných defektov na vzorkách. Pri pohľade na vytvorené steny zhora hneď po stavbe je možné vidieť kvalitu posledného vytvoreného návaru. Pri 3 vzorkách z 12 je pozorované prerušenie kontinuity návaru a vznik tzv. balling efekt Obr.67. Dané vzorky boli stavené skupinami procesných parametrov 2, 3, 6 (Tab.11).



Obr.67 Samostatné steny pod uhlom 45° - balling efekt (vzorky C2, C3, C6)

Na Obr.68 sú zobrazené na ukážku snímky posledných návarov vzoriek stavaných procesnými parametrami 7, 9, 12 (Tab.11). Podobné výsledky boli dosiahnuté pri všetkých ostatných vzorkách (skupiny procesných parametrov 1, 4, 5, 8, 10, 11) (Tab.11). Tieto návary kontinuálne s minimálnym výskytom ďalších defektov.



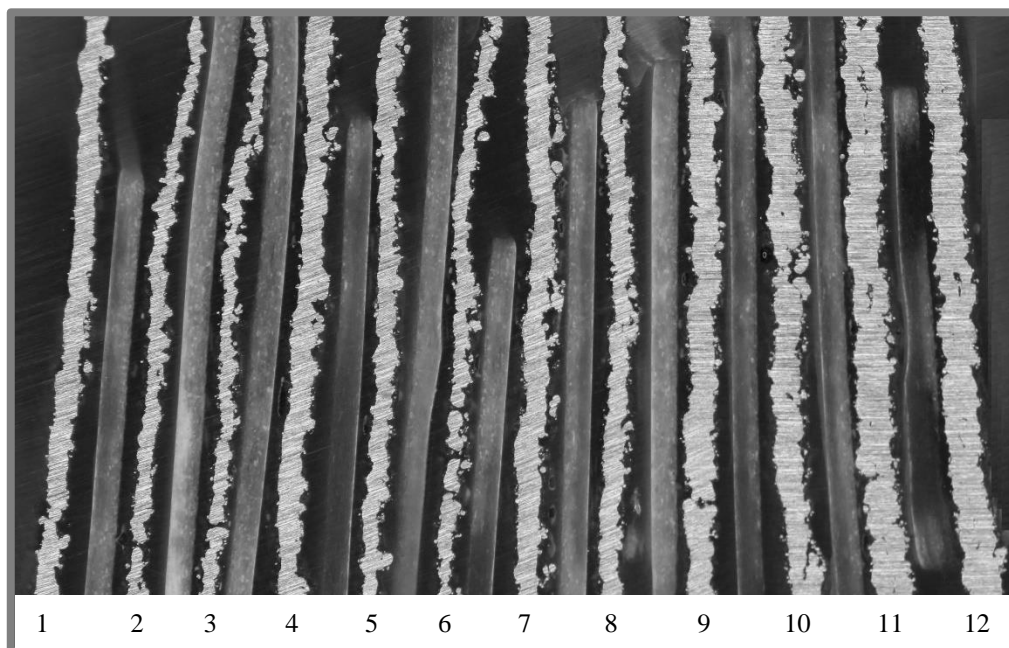
Obr.68 Samostatné steny pod uhlom s kvalitným návarom (vzorky C7, C9, C12)

**5.4.4 Analýza výbrusov samostatných stien pod uhlom 45°**

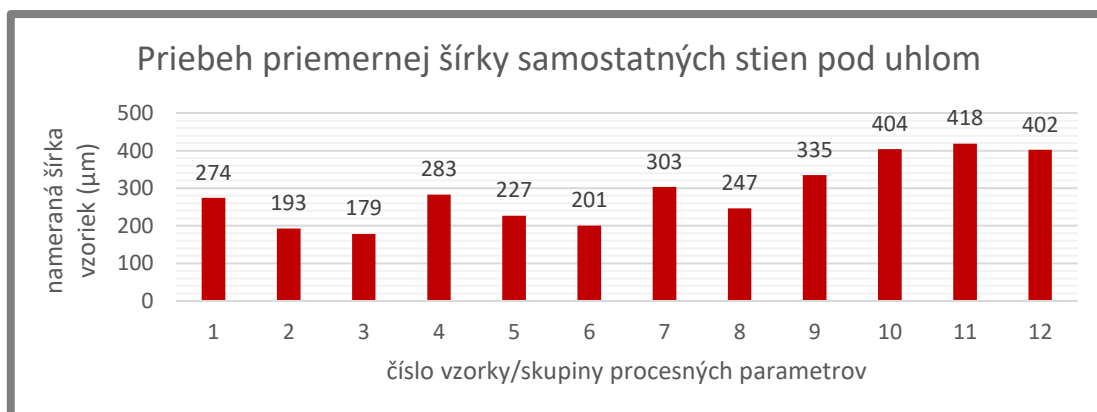
Po vytvorení metalografických výbrusoch boli na všetkých stenách viditeľné výrazné defekty (Obr.69). V porovnaní s kolmými stenami, ako bolo očakávané, nastalo výrazné zhoršenie predovšetkým povrchu. Pri niektorých vzorkách sa objavili póry zachytené v objeme, prípadné diery prechádzajúce skrz celú stenu. Pomocou výbrusu boli zmerané šírky jednotlivých stien. Získané hodnoty sú čisto ilustračné, keďže povrch jednotlivých stien je výrazne členitý a veľmi citlivý na voľbu daného rezu.



Výsledné šírky stien zobrazené na Obr.70 boli vytvorené priemerom 4 nameraných hodnôt.



Obr.69 Metalografické výbrusy samostatných stien pod uhlom 45

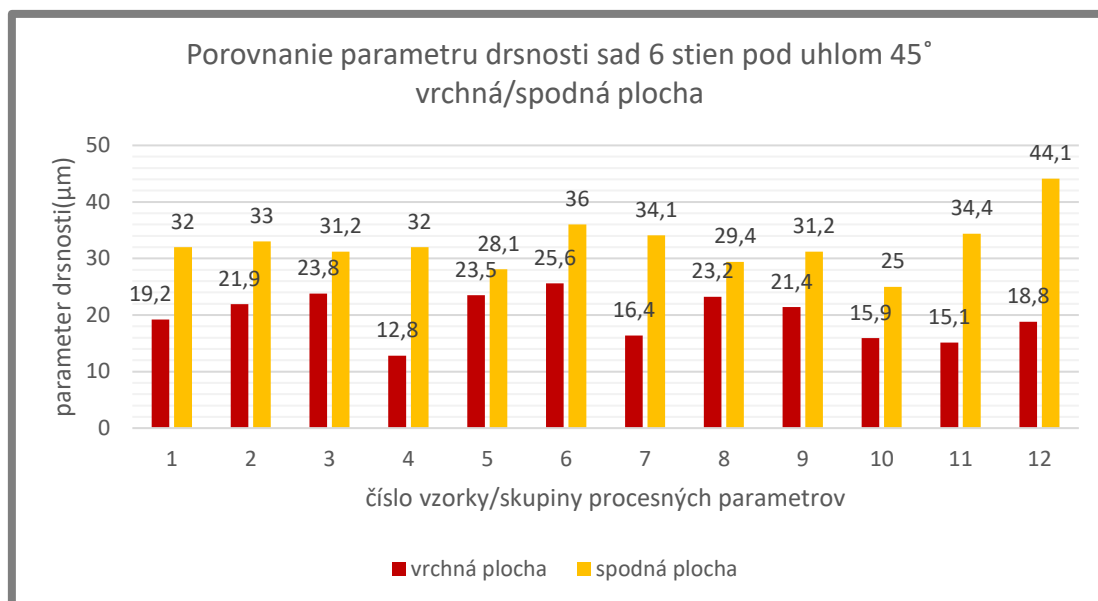


Obr.70 Priebeh šírky samostatných stien pod uhlom 45°

### 5.4.5 Analýza drsnosti povrchu samostatných stien pod uhlom 45°

Hodnoty drsnosti povrchu získané profilometrom sú zobrazené na Obr.71 . Červená (oranžová) farba reprezentuje hodnoty namerané na vrchnej (spodnej) ploche vzoriek. Podľa očakávania namerané drsnosti na vrchnej ploche dosahovali menšie hodnoty v porovnaní so spodnou časťou. Rozptyl hodnôt sa pohybuje v rozpätí od 22,7 do 29μm okrem vzorky č. 5 (Tab.11), ktorá dosahuje hodnotu 47,4μm. Spodná strana vzoriek dosahuje horšie výsledky v porovnaní s vrchnou stranou o 9 až 23μm. Pri niektorých vzorkách dochádza až k zdvojnásobeniu hodnoty drsnosti.



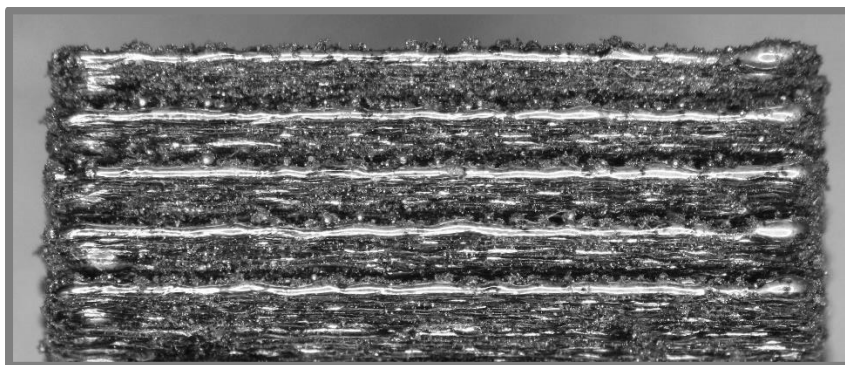


Obr.71 Namerané hodnoty drsnosti sada 6 stien pod uhlom 45°

#### 5.4.6 Analýza sad 6 stien pod uhlom 45°

5.4.6

Hneď po stavbe boli viditeľné na viacerých stenách dobré výsledky, kedy sa podarilo postaviť úspešne všetky vzorky. Pri pohľade na posledný návar stavby bolo možné sledovať prevažne návary bez obsahu väčších nespojitosti či defektov. Na Obr. 72 sú zobrazené návary jednotlivých stien pomocou skupiny procesných parametrov 7 (Tab.11).

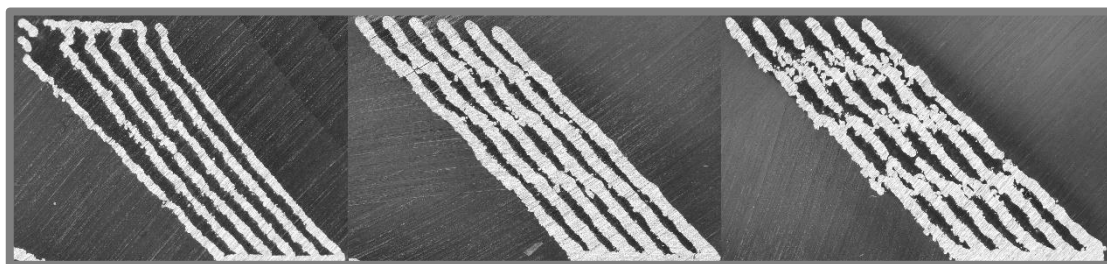


Obr. 72 Pohľad na posledné kvalitné návary stavby (vzorka E7)

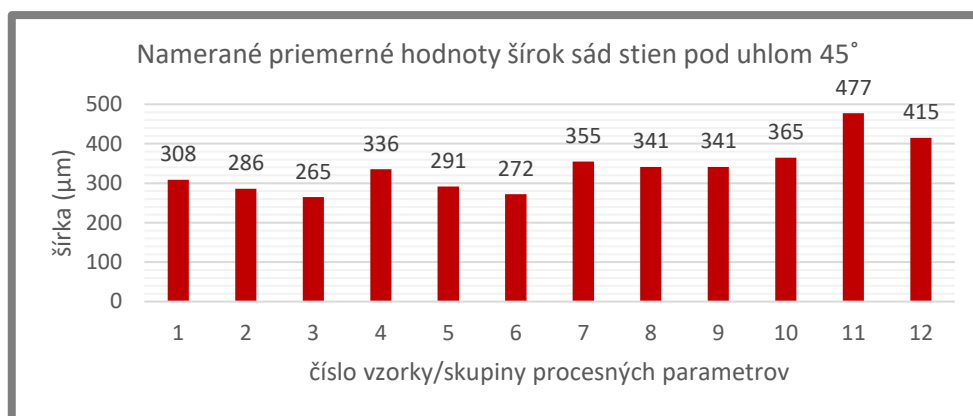
#### 5.4.7 Analýza výbrusov sad 6 stien pod uhlom 45°

5.4.7

Na všetkých sadách stien boli vytvorené metalografické výbrusy. Na vzorkách stavaných skupinami procesných parametrov 3, 6, 9 bol pozorovaný výskyt väčšieho počtu defektov, kedy pri vzorkách 3 a 6 dochádzalo v konečnej časti stavby k zdeformovaniu a k prepojeniu jednotlivých stien (Tab.11). Pri vzorkách 2, 4, 7, 8, 9, 10 (Tab.11) bolo možné vidieť jav, pri ktorom dochádzalo pri všetkých stenách každej z týchto vzoriek, k opakovaniu určitého zúženia, prípadne k menej výraznému vybočeniu steny do strany. Tento jav je najvýraznejší pri vzorke číslo 9 (Tab.11), kedy dochádza v pravidelných vzdialenostiach k jej rozpadu. Obdobný jav bol popísaný v kapitole 5.3.6, kde taktiež dochádzalo k pravidelnému zúženiu stien pri kolmých vzorkách. Jednotlivé defekty sú zobrazené na Obr.73 a namerané hodnoty šírky sú zobrazené na Obr.74.



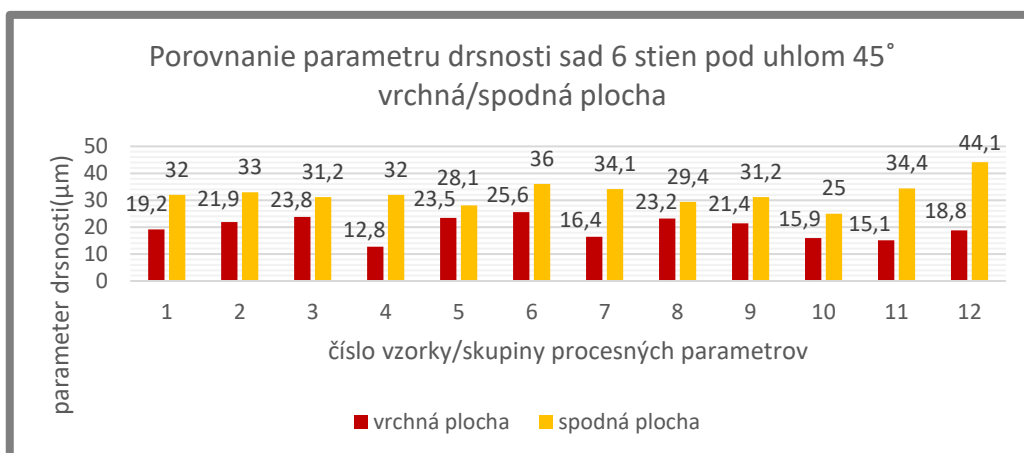
Obr.73 Pohľad na výbrusy sady 6 stien pod uhlom 45° (vzorky E3, E10, E9)



Obr.74 Priemerná šírka sád 6 stien pod uhlom 45°

#### 5.4.8 Analýza parametru drsnosti sád 6 stien pod uhlom 45°

Na všetkých sádach stien bola zmeraná drsnosť vytvorených povrchov. Keďže ide o vzorky stavané pod uhlom 45° voči stavebnej platforme, bola drsnosť meraná vždy 2x, a to na spodnej a vrchnej ploche. Podľa očakávania boli hodnoty drsnosti spodných plôch väčšie v porovnaní s vrchnými. Pri väčšine vzoriek (1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10) sa rozdiely medzi spodnou a vrchnou plochou pohybuje maximálne do 12μm (Tab.11). Najmenší rozdiel cca 5 a 6μm dosahujú vzorky stavané skupinami procesných parametrov 5 a 8. Naopak vzorky stavané parametrami 4, 7, 11, 12 (Tab.11) zaznamenávajú najväčší rozdiel, a to 17 až 25μm (Obr.75).



Obr.75 Porovnanie parametru drsnosti sád 6 stien pod uhlom 45°

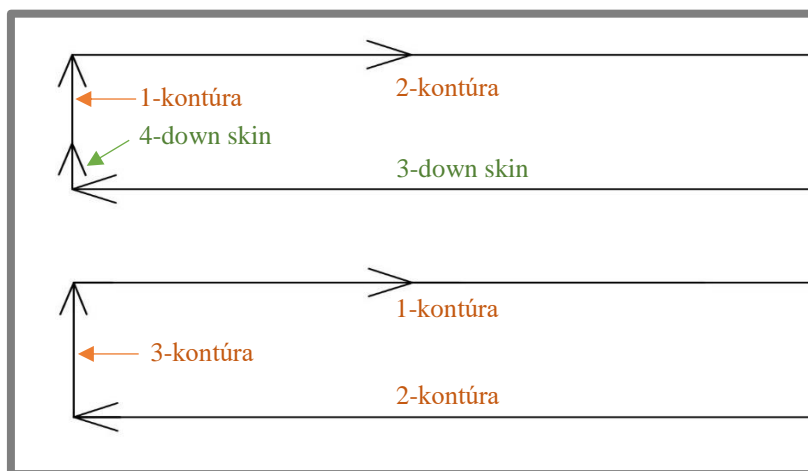
#### 5.4.9 Test parametru downskin

V tejto časti bol aplikovaný v praxi bežne používaný, no pre túto prácu nový procesný parameter s názvom down skin (spodná plocha). Program použitého zariadenia SLM je schopný rozlíšiť väčšie množstvo povrchov na základe určitých podmienok. Povrch, na ktorý je možné aplikovať parameter down skin je definovaný ako oblasť, ktorá nie je vytvorená na predchádzajúcej vrstve. Zjednodušene je možné povedať, že oblasť down skinu je oblasť, ktorá je stavaná do prášku bez predchádzajúceho pevného materiálu. Tento parameter umožňuje oblasť down skinu naskenovať rozdielnymi procesnými parametrami ako zvyšok stavaného objemu. V praxi môže byť použitý napríklad na oblasti down skin menší výkon laséra a vyššia skenovacia rýchlosť pre vytvorenie menšej tavnej oblasti na povrchu v porovnaní so skenovaním oblasti objemu daného modelu. Táto úprava parametrov môže v niektorých prípadoch zlepšiť výslednú kvalitu povrchov vytváraných pod väčšími uhlami voči platforme.

#### 5.4.10 Príprava a popis experimentu

V tomto experimente je parameter down skin testovaný na vzorkách obsahujúcich sadu 6 stien stavaných pod uhlom  $45^\circ$  (Obr.64). Samotný parameter zahŕňa približne 27 podnastavení, ktorými sa špecifikujú jeho vlastnosti a oblasť použitia. Medzi základné nastavenia upresňujúce oblasť použitia parametru down skin patria predovšetkým uhol danej plochy voči stavebnej platforme, filter krátkych trajektórií, ktorý vylúči príliš krátke skenovacie dráhy, prípadne číslo referenčnej vrstvy, z ktorej je určovaná oblasť použitia down skinu. Ďalšie podnastavenia definujú tvar a poradie skenovaných trajektórií, ako aj natočenie a posunutie novej vrstvy voči predchádzajúcej. Posledný typ nastavenia bližšie špecifikuje vlastnosti a nastavenia samotného lasera, ako je jeho výkon a skenovacia rýchlosť.

Parameter bol v tejto práci testovaný na 1. skupine procesných parametrov (Tab.11), ktorá sa predbežne javila ako najviac vhodná na ďalšie použitie. Na Obr.76 je zobrazená časť modifikovanej trajektórie laséra, ktorá je porovnaná s pôvodnou, pri ktorej bol parameter down skin vypnutý. Ako je vidno v hornej časti obrázku, trajektória spodnej (3) a časti krajnej (4) plochy bola nahradená trajektóriou down skinu. Tá pozostávala z rozdielneho nastavenia v porovnaní s kontúrou. Jednotlivé čísla reprezentujú poradie skenovania jednotlivých trajektórií.



Obr.76 Zmena skenovacej trajektórie-down skin (hore) a pôvodné hodnoty (dole)

Pri použití down skinu pri takto tenkých stenách sú kladené veľké obmedzenia, ktoré vychádzajú z veľmi malej plochy stavanej do čistého prášku. Pri výške nanášanej vrstvy prášku 50µm a uhlu stavby 45° má táto plocha na šírku v ideálnych podmienkach taktiež 50 µm. Pri takýchto hodnotách nie je možné použiť komplexnejšie skenovacie stratégie.

Nový parameter bol v práci testovaný na 1. skupine procesných parametrov (Tab.11), ktorá sa predbežne javila ako najviac vhodná na ďalšie použitie. Konkrétne bolo testovaných 9 nastavení, kedy nastávala zmena v použitom výkone laseru, 200, 300, 400W a menila sa skenovacia rýchlosť, 600, 900, 1300mm/s. Týmto rozsahom bude vytvorená základná analýza pre ďalšie použitie a vývoj tohto parametru. Pre prehľadnosť sú v Tab.13 zobrazené jednotlivé nastavenia.

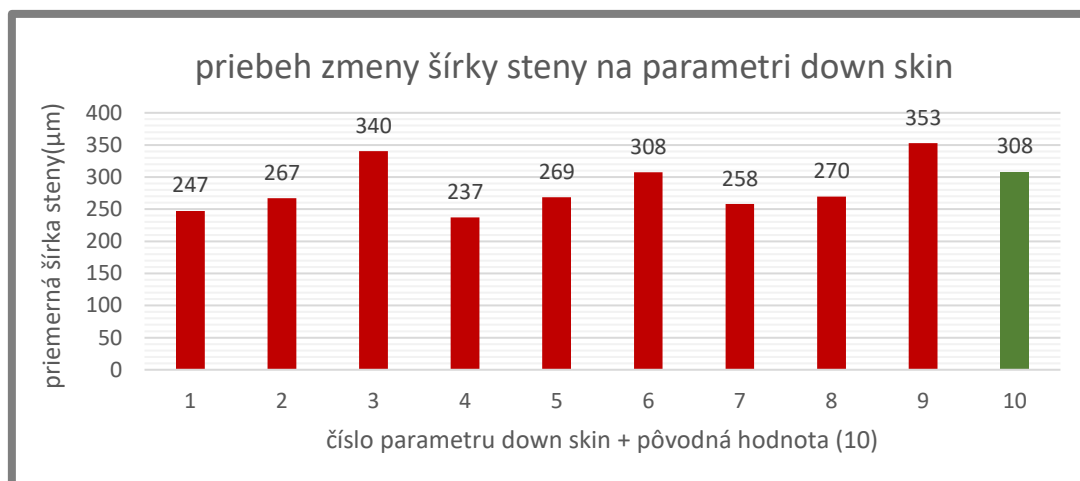
Tab.13 Tabuľka použitých parametrov pre down skin

Test down skin		skenovacia rýchlosť (mm/s)		
		600	900	1300
výkon (W)	200	1	4	7
	300	2	5	8
	400	3	6	9

#### 5.4.11 Analýza výbrusu down skin

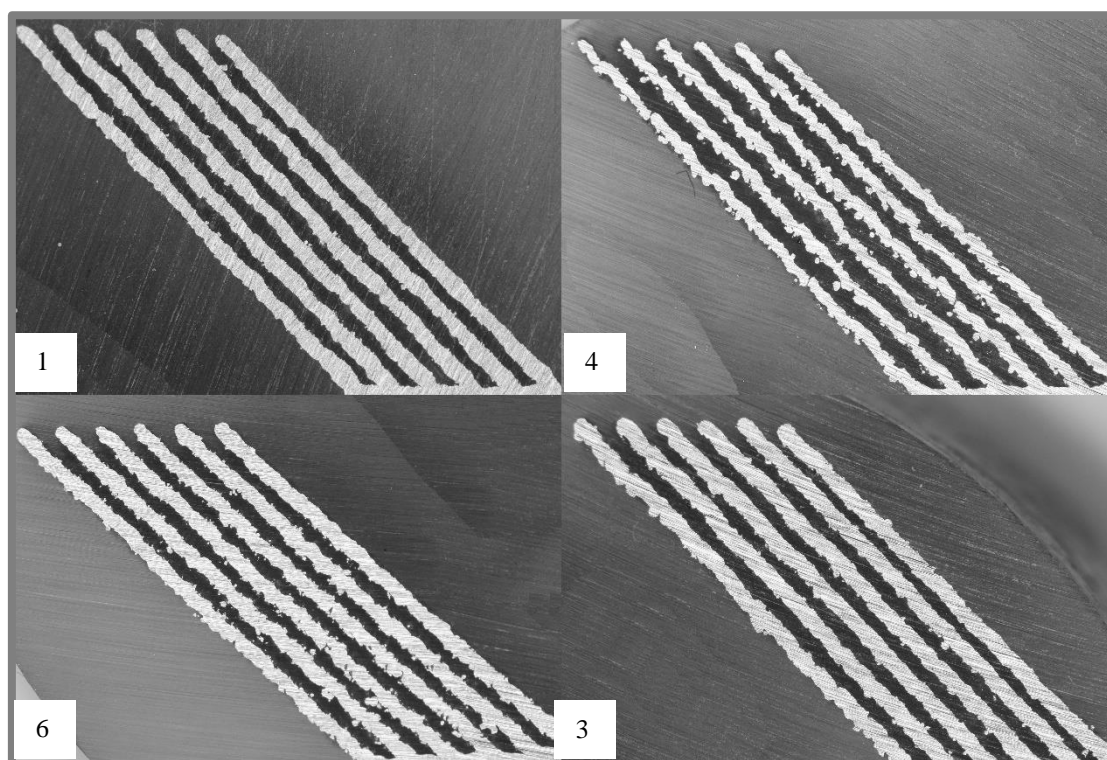
Spolu bolo vyrobených 9 vzoriek, na ktorých bol testovaný vplyv parametru downskin. Na všetkých vzorkách boli vytvorené metalografické výbrusy a získane hodnoty boli porovnateľné s výsledkami získanými bez použitia tohto parametru. Jednotlivé hodnoty boli vytvorené priemerom 6 nameraných rozmerov a sú zobrazené na Obr.77. Na ose x pod číslom 10 je označenou zelenou farbou je práve pôvodná hodnota bez parametru down skin. Ako je patrné zo získaných výsledkov, pri 6 nastaveniach (1, 2, 4, 5, 7, 8) nastalo mierne ztenšenie výsledných stien (Tab.11). Pri nastavení parametru down skin č. 6 bola nameraná rovnaká hodnota a pri č. 3 a 9 mierne zvýšenie hrúbky (Tab.11). Na základe získaných výsledkov je možné popísať trend vplyvu výkonu lasera na výsledný rozmer stien. Najmenšie namerané hrúbky boli vytvorené najmenším výkonom lasera 200 W. Zo zvyšujúcim výkonom na 300 W nastalo malé zvýšenie hrúbky stien o 12 až 32 µm. Pri výkone lasera 400 W nastalo výraznejšie zvýšenie hrúbky stien o ďalších 39 až 83µm.





Obr.77 Priebeh šírky stien po aplikácii down skin

Pri vizuálnej kontrole bolo pri 8 vzorkách viditeľné výraznejšie zhoršenie kvality povrchu výslednej steny, predovšetkým v dôsledku nasintrovaného väčšieho množstva kovového prášku prevažne na spodnej strane steny (Obr.78). Pri nastavení parametru down skin č. 4, 6, 7, 8 (Tab.13) boli viditeľné výraznejšie póry nachádzajúce sa v objeme steny. Pri nastavení č. 3 bola dosiahnutá kvalita postavenej steny vizuálne veľmi podobná pôvodnému nastaveniu bez parametru down skin.



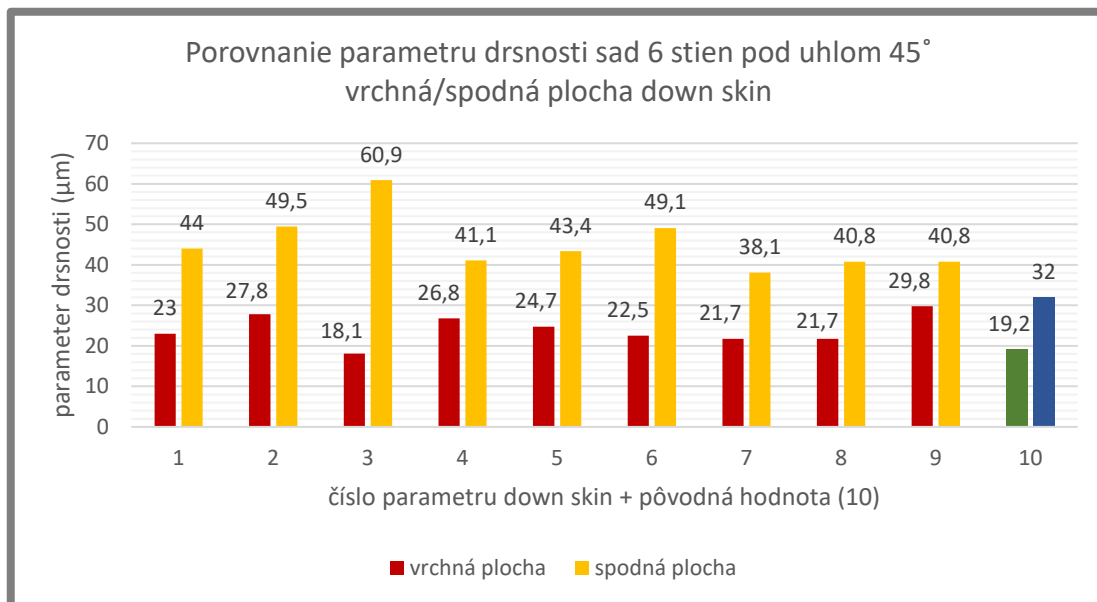
Obr.78 Ukážka vplyvu parametru downskin

## 5.4.12 Analýza parametru drsnosti down skin

5.4.12

Analýza parametru drsnosti prebehla 2x. Na Obr.79 sú zobrazené namerané výsledky. Červenou (oranžovou) farbou sú zaznamenané hodnoty drsnosti povrchu na vrchnej (spodnej) strane vzoriek. Na ose x pod číslom 10 je označené zelenou (modrou) farbou

nameraná pôvodná hodnota bez použitia parametru down skin. Podobne ako v kapitole 5.4.11 sú na všetkých vzorkách zaznamenané horšie výsledky drsnosti povrchu v porovnaní s pôvodným nastavením. Pri parametri č. 3 nastalo takmer zdvojnásobenie drsnosti na spodnej strane. Pri ostatných vzorkách boli výsledky horšie približne o 10 až 20  $\mu\text{m}$ .



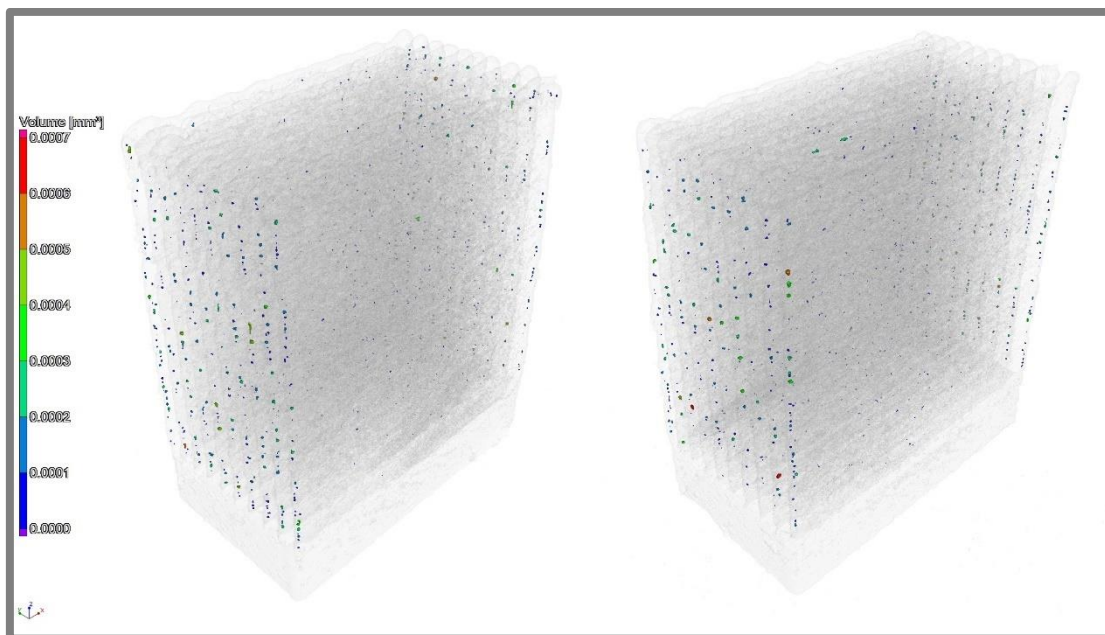
Obr.79 Vyhodnotenie parametru drsnosti po aplikácii down skinu (10-pôvodné parametre)

### 5.4.13 Zrnutie steny pod uhlom 45°

Stavba samostatných šikmých stien pod uhlom 45° preukázala výrazné zhoršenie kvality jednotlivých stien v porovnaní s kolmými vzorkami. Tento výsledok bol očakávaný. Do experimentu boli zahrnuté taktiež sady 6 kolmých stien postavených pod uhlom 45°. Toto usporiadanie zlepšilo výslednu kvalitu jednotlivých stien.

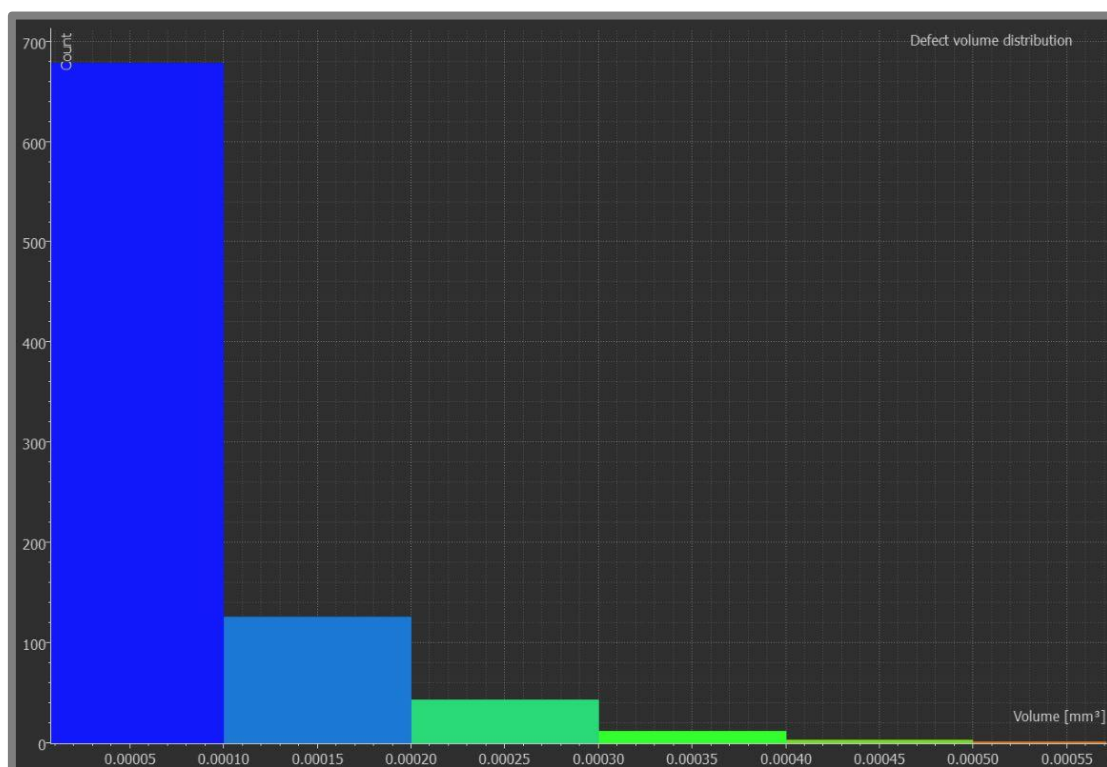
## 5.5 Analýza pomocou $\mu\text{CT}$

Na analýzu pomocou  $\mu\text{CT}$  (rozlíšenie voxelu=1  $\mu\text{m}$ ) boli vybrané kolmé vzorky stavané skupinou procesných parametrov 1 (X1, X2, X3)(Tab.11). Test bol opakovaný na 3 vzorkách. Priemerná relatívna hustota vytvorených objemov dosahuje hodnotu 99,97%. Na Obr.80 je vytvorená 3D vizualizácia, ktorá zobrazuje rozloženie porozity v objeme vzoriek X1 a X2. Ako je patrné, tak najväčší výskyt porozity sa nachádza v krajných oblastiach stien. V tejto istej časti dochádza aj k vzniku hranového efektu, ktorý spôsobuje natavenie väčšieho množstva prášku.



Obr.80 Vizualizácia rozloženia porozity v objeme (vzorky X1, X2)

Na Obr.81 je zobrazený histogram vyskytu defektov na vzorke X3. Z histogramu je zrejme, že najväčší počet defektov má objem do 0,00005 mm<sup>3</sup>. So zvyšujúcim sa objemom defektov nastáva rapidný pokles ich počtu. Najväčšie defekty s rozmerom 0,00055 mm<sup>3</sup> dosahujú len minimálny počet.



Obr.81 Histogram výskytu defektov zistených pomocou  $\mu\text{Ct}$



### 5.5.1

Na základe výsledkov tejto diplomovej práce boli vytvorené malé objemové telesá práve skupinou procesných parametrov č. 1 (Tab.11), na ktorých bola vyhodnotená tvrdosť podľa Vickersa. Táto skupina parametrov bola zvolená pre jej vysokú relatívnu hustotu dosahujúcu 99,97%. Taktiež týmito parametrami boli dosiahnuté najkvalitnejšie povrchy s nízkymi hodnotami drsnosti. Tvrdosť bola meraná na 3 vzorkách a získané hodnoty sú zobrazené v prílohe č. 9 na protokole merania.

## 6 DISKUSIA

Diplomová práca bola zameraná na nájdenie vhodného zoskupenia procesných parametrov, ktorým by bolo možné spracovať použitú zliatinu medi pre tenkostennú aplikáciu. Za cieľom spracovania podobných zliatin bolo v minulosti vytvorených viacero štúdií, ktorých hlavne ťažisko bolo orientované smerom na objemové telesá. Diplomová práca nadviazala na základný výskum Kočicu (16), kde bola použitá rovnaká zliatina medi. Podobne ako v štúdiách v rešeršnej časti, bol tento výskum zameraný na objemové telesá. V práci Kočicu bola nájdená skupina procesných parametrov, kedy bola dosiahnutá relatívna hustota objemových vzoriek 99,95%.

V práci bol použitý recyklovaný medený prášok, ktorý bol už použitý na predchádzajúci výskum. Prášok bol zakúpený od firmy Sandvik Osprey. Po zakúpení bol podrobený analýze morfológie a distribúcie častíc. Častice prášku majú féricky tvar so zastúpením všetkých rozmerov. Variabilita veľkosti častíc je pri technológii SLM dôležitá pre dobré vytvorenie nanášanej vrstvy, kedy dochádza k vyplneniu priestoru medzi veľkými časticami menšími. Použitý prášok spĺňa podmienky pre použitie hrúbky nanášanej vrstvy 50  $\mu\text{m}$ .

Prvé vzorky, tenké kolmé steny, stavané v tejto práci čiastočne vychádzali z výsledkov kočicu. V experimente bolo overené široké pole procesných parametrov na 100 vzorkách. Konkrétne bol testovaný výkon 350 a 400 W. Menšie hodnoty neboli použité v dôsledku dobrej tepelnej vodivosti a odrazivosti medi. Taktiež bola snaha pre zníženie ekonomických nákladov využívať vyššie skenovacie rýchlosti, ktoré sa menili v rozpätí od 800 do 1700 mm/s. Steny boli stavané len kontúrou, ktorá mala tvar obdĺžnika so šírkou od 1 do 200  $\mu\text{m}$ . Program zariadenia SLM neumožňuje postaviť vzorky iba jedným návarom. V pripravených dátach na stavbu musí byť vždy prítomná uzatvorená kontúra. Vzorky boli podrobené vizuálnej analýze posledného návaru, analýze kvality povrchu a pomocou metalografických výbrusov bol analyzovaný objem v reze. Pri niektorých vzorkách bolo možné vidieť defekty pri posledných milimetroch stavby, kedy dochádzalo k rozdzvojeniu vzoriek (Obr.35). Na základe analýz bolo určených 12 perspektívnych skupín procesných parametrov, ktoré boli ďalej podrobne skúmané (Tab.11).

Na základe získaných výsledkov prvého testu bol pripravený ďalší experiment. Za cieľom overenia opakovateľnosti boli znovu postavené samostatné kolmé steny. Ich počet bol zredukovaný na 12 (Tab.11), kedy bola postavená vždy jedna stena jednou skupinou procesných parametrov. Výsledky ukázali, že opätovné postavenie týchto vzoriek sa nepodarilo okrem dvoch stien pomocou skupín procesných parametrov 11 a 12 (Tab.11). Ostatné steny približne po polovici stavby odpadli, alebo obsahovali veľký počet defektov. V dôsledku neúspechu týchto vzoriek bol test zopakovaný, kedy boli dosiahnuté takmer identické výsledky. Opäť sa podarilo úspešne postaviť len 2 steny procesnými parametrami 11 a 12 (Tab.11). Počas oboch stavieb boli na stavebnej platforme umiestnené ďalšie vzorky. V porovnaní s prvým experimentom obsahujúcim iba tenké steny mohla nastať zmena skenovacieho času jednej vrstvy. V dôsledku výbornej tepelnej vodivosti medi mohla pri zmene skenovacej doby nastať odlišná distribúcia tepla cez vzorky do platformy a okolitého

prášku. Taktiež steny stavané skupinami procesných parametrov 11 a 12 (Tab.11) sa odlišujú od väčšiny ostatných vzoriek vzdialenosťou trajektórií jednotlivých dráh laséra, ktorých vzdialenosť bola 100 a 50  $\mu\text{m}$ . Tento fakt mohol spôsobiť lepšiu stabilitu tenkých stien.

Počas stavby už spomenutých tenkých stien sa na jednej stavebnej platforme nachádzali vzorky zložené z 20 tenkých stien vzdialených od seba 100  $\mu\text{m}$ . Sady stien boli navrhnuté za cieľom priblíženia sa reálnym podmienkam. V praxi pri tvorbe chladiča, prípadne tepelného výmenníka, sa vyskytuje bežne veľké množstvo tenkých lamel usporiadaných tesne vedľa seba za cieľom maximalizovania výmennej plochy medzi chladiacim a chladeným médiom. Spolu bolo postavených 16 sád stien pomocou skupín procesných parametrov 1, 6, 7, 9 (Tab.11). Každou skupinou boli postavené 4 vzorky umiestnené v rohových oblastiach stavebnej platformy, čím vznikli 4 zoskupenia 4 sád stien. Toto usporiadanie bolo navrhnuté za cieľom zopakovania stavby jednotlivých vzoriek a overenia vplyvu polohy danej vzorky na platforme. Posledný návar bol na všetkých vzorkách podobný, bez väčších defektov a obsahoval len krátke prerušenia. V tejto časti boli viditeľné menšie rozdiely medzi návarmi umiestnenými pri vstupe inertného plynu do stavebnej komory a návarmi na strane jeho výstupu. Vzorky situované pri vstupe plynu obsahovali menšie množstvo defektov. Taktiež bol tento vplyv viditeľný na výbrusoch a drsnosti povrchu. Vzorky umiestnené opäť pri vstupe interného plynu do komory dosahovali menšie hrúbky a vyššie drsnosti povrchu. Tento vplyv môže byť spôsobený rovnomernejším prúdením ochrannej atmosféry v oblasti tesne za jej vstupom do komory. Ďalší proces, ktorý môže mať za následok zmenu kvality stien, môže spočívať v odnášaní vytvorených spalín už na postavené vrstvy, ktoré sú následne nanášacím zariadením pokryté novou vrstvou čistého kovového prášku. Pri pohľade na výbrusy boli pri všetkých vzorkách bolo vidieť oblasti, kde došlo k prepojeniu jednotlivých stien. Tieto defekty boli spôsobené malou vzdialenosťou medzi jednotlivými stenami. V porovnaní so samostatnými stenami nastalo zväčšenie hrúbky pri všetkých sádach stien. Tento výsledok je spôsobený v dôsledku vyššej koncentrácie stien, čo spôsobuje väčšie množstvo dodávanej energie do menšej plochy, čím nastáva väčšie prehriatie okolitého prášku a jeho natavenie počas stavby.

Ďalší experiment obsahoval modifikované sady 10 stien, kedy bola navrhnutá vzdialenosť medzi stenami na 400  $\mu\text{m}$ . Do tejto stavby bolo zahrnutých všetkých 12 zúžených skupín procesných parametrov (Tab.11). Podobne ako pri sádach 20 stien v predchádzajúcom experimente bolo postavených spolu 48 vzoriek, rozdelených do 4 zoskupení po 12 vzorkách v rohových oblastiach. Tieto sady boli rozdelené na 2 stavebné platformy. Hneď po stavbe boli viditeľné defekty na vzorkách stavaných skupinami procesných parametrov 2, 3, 5, 6, 8 (Tab.11). Po vytvorení metalografických výbrusoch nastalo výrazné zlepšenie kvality niektorých vzoriek. Skupiny procesných parametrov 1, 3, 6, 7, 10 (Tab.11) vykazovali menšie šírky stien na pozíciách bližších pri vstupe inertného plynu do komory. Pri ostatných vzorkách boli namerané hodnoty približne podobné na všetkých pozíciách. Na výbrusoch bolo vidno taktiež už spomenuté defekty. Na vzorkách s parametrami 2, 3, 5, 6, 8 (Tab.11) nastával jav, kedy dochádzalo k vybočeniu jednotlivých stien zo stredu do strán. Po dosiahnutí určitej výšky stavby bolo toto vychýlenie natoľko veľké, že došlo k stavbe nasledujúcich vrstiev už mimo postavenú časť do kovového prášku, prípadne nová

vrstva sa len čiastočne napojila na predchádzajúcu pevnú časť. Tento fenomén môže byť spôsobený hranovým efektom, kedy dochádza k nadvihnutiu okrajov stien. Tento jav sa vyskytuje pri rohových, hranových oblastiach, kde nastáva dlhšia skenovacia doba danej oblasti v dôsledku zalomenia trajektórie lasera. Tým sa oblasť viac prehreje a nataví sa väčšie množstvo prášku, ktorý zaujme menej energetický náročný stav v dôsledku povrchového napätia taveniny. Následne počas obojstranného nanášania novej vrstvy prášku do týchto vyčnievajúcich častí môže narážať brit nanášacieho zariadenia, ktorý v dôsledku natočenia vzoriek o 5° do strany spôsobí ich postupné vybočenie. Vzorky postavené skupinami procesných parametrov 1, 7 a čiastočne 4, 9 obsahovali najmenšie množstvo defektov, najkvalitnejší povrch aj objem. Na týchto vzorkách sa začal vyskytovať jav, ktorý spôsoboval na jednotlivých stenách v takmer pravidelných intervaloch ich zúženie. Toto zúženie sa vyskytovalo na vzorkách stavaných rovnakou skupinou procesných parametrov v rozličných pozíciách vždy v rovnakej výške. Pri porovnaní rozličných skupín procesných parametrov (1, 4, 7, 9) (Tab.11) sa toto zúženie vyskytovalo vždy v inej výške. Výskyt tohto fenoménu môže byť predmetom ďalšieho výskumu. Pri analýze drsnosti povrchu bola opäť viditeľná závislosť polohy vzorky na stavebnej platforme pri skupinách procesných parametrov 5, 7, 9, 10, 11 (Tab.11). Steny umiestnené bližšie k vstupu inertného plynu do komory dosahovali vyššie hodnoty drsnosti. Vzorky stavané skupinou parametrov 12 (Tab.11) vykazovali presne opačný trend drsnosti.

Posledný typ vzoriek vytvorených v tejto práci boli steny zvierajúce uhol 45° voči stavebnej platforme. Uhol 45° bol zvolený za cieľom maximálne zviditeľniť vplyv zmeny uhlu stavby. Pri použití väčšieho uhla bez podpor by mohol nastať kolaps. V bežnej praxi je nemožné vytvárať komponenty vždy kolmo voči stavebnej platforme. Na stenách pod uhlom bolo otestovaných všetkých 12 skupín procesných parametrov (Tab.11). Testovacie vzorky boli samostatné tenké steny a sady 6 stien vzdialených od seba 400 µm. Pri pohľade na posledný návar samostatných stien postavených parametrami 2, 3, 6 bolo možné vidieť tzv. balling efekt, kedy nastávalo rozpadnutie návaru na malé guľičky. Pri ostatných vzorkách boli vytvorené kvalitné návary s minimálnym výskytom defektov a nespojitostí. Pri pohľade na steny pomocou metalografických výbrusov bolo viditeľné výrazné zhoršenie kvality všetkých povrchov. Pri analýze drsnosti boli výsledne hodnoty v porovnaní s kolmými stenami priemerne horšie o 22,7 až 29 µm. Pri skupine procesných parametrov č. 5 (Tab.11) bola táto hodnota väčšia o 47,4 µm. Pri niektorých vzorkách došlo až k zdvojnásobneniu hodnôt pôvodnej drsnosti. Pri sadách 6 stien boli pri pohľade zhora pozorované na všetkých vzorkách vytvorené kontinuálne návary s minimom nedostatkov. Po vytvorení metalografických výbrusov boli objavené na viacerých vzorkách defekty. Pri stenách 3 a 6 nastalo pri posledných vrstvách stavby k ich deformácií a prepojeniu. Vzorky postavené skupinami procesných parametrov 2, 4, 7, 8, 9, 10 (Tab.11) obsahovali už spomenutý jav, kedy nastávalo počas stavby v pravidelných intervaloch zúženie stien. Pri šikmých stenách bolo toto zúženie čiastočne sprevádzané jemným vybočením do strany. Analýza drsnosti prebiehala vždy 2x, na vrchnej a spodnej strane vzorky. Pri porovnaní získaných hodnôt väčšina vzoriek (parametre 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10) (Tab.11) dosahuje rozdiel do 12 µm pri porovnaní vrchnej a spodnej strany. Skupiny parametrov 5 a 8 dosahujú najmenšie rozdiely, 5 až 8 µm. Na ostatných vzorkách je zaznamenaný najväčší rozdiel, 17 až 25 µm. V závere riešenia diplomovej práce bol overený špeciálny procesný parameter,

down skin (spodná plocha). Vplyv tohto parametra bol otestovaný na vzorkách sady 6 stien stavaných pod uhlom  $45^\circ$  pomocou skupiny procesných parametrov č. 1 (Tab.11). Bol otestovaný vplyv zmeny výkonu ( $I_p = 200, 300, 400 \text{ W}$ ) a skenovacej rýchlosti ( $v_s = 600, 900, 1300 \text{ mm/s}$ ). Pri použití výkonu laséra  $200 \text{ W}$  nastalo mierne zúženie stien, čo bolo predpokladané v dôsledku vytvorenia menšej tavnej plochy. Pri výkone  $300 \text{ W}$  bolo zaznamenané malé navýšenie a pri  $400 \text{ W}$  nameraná hodnota sa zvýšila priemerne o  $39$  až  $83 \text{ }\mu\text{m}$ . Pri vizuálnej kontrole metalografických výbrusov bolo pri  $8$  vzorkách viditeľné výrazné zhoršenie kvality všetkých povrchov. Pri vzorke č. 3 bol výsledný tvar podobný pôvodným výsledkom bez aplikácie down skinu. Pri analýze drsnosti povrchu všetky vzorky vykazovali na vrchnej aj spodnej strane zhoršenie hodnôt o  $10$  až  $20 \text{ }\mu\text{m}$ .

## 7 ZÁVER

Hlavným cieľom diplomovej práce bolo nájsť s využitím experimentálnych metód vhodné zoskupenie procesných parametrov, pomocou ktorých bude možné spracovať vybranú zliatinu medi. Ťažisko práce bolo zamerané na tenkostenné vzorky. Medzi sekundárne ciele patrilo definovanie hlavných procesných parametrov a návrh experimentov. S tým bola spojená realizácia samotných experimentov a následná analýza a vyhodnotenie získaných výsledkov.

Na základe výsledkov realizovaných v diplomovej práci bola potvrdená možnosť spracovateľnosti zlatimy medi  $\text{Cu}_{7,2}\text{Ni}_{1,8}\text{Si}_{1,8}\text{Cr}$  pomocou SLM s aplikáciou na tenkostenné štruktúry. Najtenšie steny s nízkou drsnosťou povrchu 14-15  $\mu\text{m}$  dosahovali šírku 300-360  $\mu\text{m}$ . Hodnoty sú zadané intervalmi, pretože v práci bol dokázaný vplyv polohy vzoriek na stavebnej platforme, ktorý bude potrebné zohľadniť pri návrhu a výrobe ďalších komponentov. Bolo dokázané, že vzorky nachádzajúce sa bližšie pri vstupe inertného plynu do stavebnej komory dosahujú menšie hrúbky o 50 až 60  $\mu\text{m}$ . Na drsnosti povrchu nebol vplyv polohy preukázaný. Tieto tvrdenia platia pri výkone 400 W, skenovacej rýchlosti 900 mm/s a vzdialenosti trajektórií laséra 1  $\mu\text{m}$  pre kolmé steny (pri zvýšenej koncentrácii stien). Vzorky postavené týmito procesnými parametrami boli podrobené analýze pomocou  $\mu\text{Ct}$ , kedy bola dosiahnutá relatívna hustota 99,97%. Pri stavbe šikmých plôch bez podpor pod uhlom  $45^\circ$  nastalo podľa očakávania zhoršenie kvality povrchu. Dosiahnutá drsnosť vrchnej plochy bola 19,2  $\mu\text{m}$ , spodnej 32  $\mu\text{m}$ . Hrúbka bola takmer identická v porovnaní s kolmými vzorkami, a to 308  $\mu\text{m}$ . Za cieľom ovplyvnenia kvality povrchu pri vzorkách pod uhlom bol otestovaný nový procesný parameter down skin. Jeho použitím nastalo zhoršenie všetkých výsledkov.

Hlavný cieľ, ako aj sekundárne ciele diplomovej práce boli splnené v plnom rozsahu. Na výsledky získane v tejto práci je možné nadviazať výskumom tenkostenných kanálov s komplexnejšou geometriou. Ďalší smer potencionálneho záujmu do budúcnosti by mohla byť oblasť prepojenia tenkostenných štruktúr s objemovými časťami, ako aj objasnenie dôvodu vzniku fenoménu pravidelne sa opakujúceho zúženia. Dôležitú úlohu zohráva aj funkcia kontroly nanosenej vrstvy, ktorá so zliatinami medi nefunguje.

---

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- (1) The Kate Gleason. Rochester Institute of Technology [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <https://people.rit.edu/drceie/Research.html>
- (2) LÖBER, L., SCHIMANSKY, F. P., KÜHN, U., PYCZAK, F., ECKERT, J. Selective laser melting of a beta-solidifying Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, 214(9): 1852-1860. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.04.002. ISSN 09240136.
- (3) YADROITSEV a I. SMUROV. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia* [online]. 2010, 5: 551-560 [cit. 2018-1-15]. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.083.
- (4) Jamasp Jhabvala , a et. al. On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process, *Virtual and Physical Prototyping*. 2010, vol. 5, no. 2, str. 99-109, DOI: 10.1080/17452751003688368.
- (5) KHAN, M., et al. Numerical Simulation of Meltpool Instability in the Selective Laser Melting (SLM) Process. *Lasers in Engineering* [online]. 2014, s. 28. [cit.2016-01-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Nadeem\\_Sheikh5/publication/265794173\\_Numerical\\_Simulation\\_of\\_Meltpool\\_Instability\\_in\\_the\\_Selective\\_Laser\\_Melting\\_\(SLM\)\\_Process/links/541c09e20cf241a65a0bacfc.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nadeem_Sheikh5/publication/265794173_Numerical_Simulation_of_Meltpool_Instability_in_the_Selective_Laser_Melting_(SLM)_Process/links/541c09e20cf241a65a0bacfc.pdf)
- (6) LEE, Y. S. a W. ZHANG. Mesoscopic Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow in Laser Powder Bed Additive Manufacturing [online]. 2018, s. 1154–1165. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-94-Lee.pdf>
- (7) YASA, E. a J. KRUTH. Application of laser re-melting on selective laser melting parts. *Advances in Production Engineering & Management* [online]. 2011, Vol. 6, no. 4, s. 259-270 [cit. 2018-8-11]. Dostupné z: [https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4\\_259-270.pdf](https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf)
- (8) Citim AM, Inc. Data Sheet Selective Laser Melting CuNi2SiCr [online] Kennesaw 6.2015 [cit. 2017-06-05].
- (9) WU, W., YANG, Y., HUANG, Y., Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting. In: *Chinese optics letters: COL / sponsored by the Chinese Optical Society*. 2007, Vol. 5 Iss 1, s.37-40. ISSN 1671-7694
- (10) ZHANG, D. Q., LIU, Z. H., CHUA, C. K., Investigation on forming proces of copper alloy via Selective Laser Melting In: *High Value Manufacturing*



- Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013, Leiden: CRC Press/Balkema, 2014. ISBN 978-1-138-00137-4
- (11) Zhang, D. Q., Liu, Z. H., Li, S., et al., Selective Laser Melting: On the Study of Microstructure of K220, In: 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing, Nanyang, Singapore, 26-28 May, 2014, ISBN: 978-981-09-0446-3 DOI: doi:10.3850/978-981-09-0446-3\_049
  - (12) Ventura, A.P., Wade, C.A., Pawlikowski, G. et al. Metall and Mat Trans A (2017) 48: 178. doi:10.1007/s11661-016-3779-x, dostupné z: <https://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s11661-016-3779-x>
  - (13) MAO, Zhongfa, David ZHANG, Peitang WEI a Kaifei ZHANG. Manufacturing Feasibility and Forming Properties of Cu-4Sn in Selective Laser Melting. Materials [online]. 2017, 10(4), 333- [cit. 2017-06-05]. DOI: 10.3390/ma10040333. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/4/333>
  - (14) POPOVICH, A., V. SUFIAROV, I. POLOZOV, E. BORISOV, D. MASAYLO a A. ORLOV. Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy. Materials Letters [online]. 2016, 179, 38-41 [cit. 2017-06-05]. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.05.064. ISSN 0167577x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X16307819>
  - (15) SCUDINO, S., C. UNTERDÖRFER, K.G. PRASHANTH, H. ATTAR, N. ELLENDT, V. UHLENWINKEL a J. ECKERT. Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze. Materials Letters [online]. 2015, 156, 202-204 [cit. 2017-06-05]. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.05.076. ISSN 0167577x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X15007983>
  - (16) LYKOV, P.A., E.V. SAFONOV a A.M. AKHMEDIANOV. Selective Laser Melting of Copper. Materials Science Forum [online]. 2016, 843, 284-288 [cit. 2017-06-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.284. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.843.284>
  - (17) MatWeb.com. Material property data [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/>
  - (18) KOČICA, M. *Zpracování slitin mědi pomocí technologie selective laser melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 115 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..
  - (19) Sculpteo [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com>
  - (20) SLM Solutions GmbH. SLM 280 HL [online]. 2012 [cit. 2015-1-11]. Dostupné z: [http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-280\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-280_en)

- (21) SKULINA, D. Zpracování Al-Sc hliníkové slitiny technologií SLM. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 85 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..
- (22) Yting [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: [https://i.ytimg.com/vi/WTvGi\\_GGCGM/maxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/WTvGi_GGCGM/maxresdefault.jpg)

## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

9

---

1D	Jednodimenzionálny
3D	Trojdimenzionálny
CAD	Computer Aided Design
Hd	Hatch distance
Lp	Laser power
Ss	Scanning speed
SEM	Scanning Elektron Microscopy
SLM	Selective Laser Melting
μCT	Micro Computer Tomography

## 10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1 Ukážka komplexnej geometrie (1)	13
Obr. 2 Schéma zariadenia SLM (2)	14
Obr. 3 Jednotlivé návary vytvorené výkonom 50 W a meniacou sa šírkou vrstvy (3)	15
Obr. 4 Používané skenovacie stratégie (4)	16
Obr. 5 Ukážka schodového efektu (7)	17
Obr. 6 Chemické zloženie UNS C18400 (10)	18
Obr. 7 Použitá skenovacia rýchlosť a výkon lasera pre lúč	18
Obr. 8 Použitá skenovacia rýchlosť a výkon lasera	18
Obr. 9 Testovacia vzorka tenkých stien (10)	19
Obr. 10 Závislosť relatívnej hustoty na hustote objemovej energie (11)	19
Obr. 11 SLM vzorky vytvorené z kovového prášku K220 (11)	20
Obr. 12 Závislosť odrazivosti kovového prášku	20
Obr. 13 Závislosť napätia na relatívnej deformácii	21
Obr. 14 Dosiahnuté mechanické vlastnosti hneď po tlači a po tepelnom.	21
Obr. 15 Rozmery testovacích vzoriek (ASTM-E8) (12)	22
Obr. 16 Závislosť napätia na relatívnom predĺžení (12)	22
Obr. 17 Tvar a distribúcia prášku (13)	22
Obr. 18 Procesné parametre použité pri single track testoch (13)	23
Obr. 19 Rozmery trhacích vzoriek (13)	23
Obr. 20 Použitá skenovacia stratégia (13)	24
Obr. 21 Mikroštruktúra Cu-Cr-Zr-Ti (14)	25
Obr. 22 Mechanické vlastnosti Cu-Cr-Zr-Ti (14)	25
Obr. 23 Priebeh napätia SLM vs odlievajúcich vzoriek (15)	26
Obr. 24 Použité procesné parametre (16)	26
Obr. 25 Cube vzorky postavené z medi (10)	26
Obr. 26 SEM analýza použitého prášku (18)	29
Obr. 27 Distribúcia použitého prášku (18)	30
Obr. 28 Zariadenie SLM 280 <sup>HL</sup> (18)	30
Obr. 29 Diagram postupu práce	31
Obr. 30 Analýza samotného návaru (18)	33
Obr. 31 Snímka vrchného pohľadu na tenkú stenu	34
Obr. 32 Rozloženie tenkých stien na stavebnej platforme	34
Obr. 33 Rozloženie vzoriek na platforme	38
Obr. 34 Vzorky hneď po stavbe	39
Obr. 35 Defekt objavujúci sa pri poslednom milimetri stavby	40
Obr. 36 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 1	43
Obr. 37 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 1	43
Obr. 38 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 2	44
Obr. 39 Závislosť nameranej hodnoty šírky steny pomocou výbrusov platforma 2	44
Obr. 40 Snímky použité pri vyhodnocovaní vzoriek 1-nevhodný	46
Obr. 41 Snímky použité pri vyhodnocovaní vzoriek 2-vhodný	46
Obr. 42 Model zoskupenia-sady 20 stien	48
Obr. 43 Rozloženie vzoriek na platforme s označenými pozíciami	49
Obr. 44 Rozloženie vzoriek na platforme	49
Obr. 45 Stavebná platforma so vzorkami hneď po stavbe	50
Obr. 46 Pohľad na sadu 20 stien postavenú skupinou proc. parametrov 1	51

v rôznych polohách na platforme ( $l_p=400$ W, $ss=900$ mm/s, $hd=1$ $\mu$ m)	51
Obr. 47 Bočný pohľad na sadu 20 stien postavenú skupinou procesných	51
Obr. 48 Pohľad na veľké množstvo defektov na výbrusoch 4 sád 20	52
Obr. 49 Závislosť šírky stien na pozícií na platforme (proc. parametre 1, 6, 7, 9)	52
Obr. 50 Závislosť parametru drsnosti na pozícií na platforme	53
Obr. 51 Rozloženie pozícií a vzoriek na stavebnej platforme 1	55
Obr. 52 Rozloženie pozícií a vzoriek na stavebnej platforme 2	55
Obr. 53 Samostatné kolmé steny	56
Obr. 54 Porovnanie parametru drsnosti samostatné steny experiment 1, 3	56
Obr. 55 Horný pohľad na sadu 10 stien B1-1, B1-4	57
Obr. 56 Pribeh šírky sád 10 stien 1-proc. parametre 1, 3, 6, 7, 10	58
Obr. 57 Pribeh šírky sád 10 stien 2-proc. parametre 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12	58
Obr. 58 Defekt oddelených stien (vzorky B2-1, B3-1, B2-2, B5-1)	58
Obr. 59 Viditeľné väčšie množstvo nasintrovaného prášku	59
Obr. 60 Vzorky bez defektov (vzorky B1-1, B1-2, B1-3, B7-3)	60
Obr. 61 Zhrnutie parametru drsnosti sada 10 stien 1	60
Obr. 62 Zhrnutie parametru drsnosti sada 10 stien 1	62
Obr. 63 Zmena skenovacej plochy pri uhle $45^\circ$	63
Obr. 64 Modely sád 6 stien pod uhlom $45^\circ$	63
Obr. 65 Rozloženie vzoriek na platforme-samostatné steny poh uhlom $45^\circ$	64
Obr. 66 Rozloženie vzoriek na platforme-sady stien pod uhlom $45^\circ$	64
Obr. 67 Samostatné steny pod uhlom $45^\circ$ - balling efekt (vzorky C2, C3, C6)	65
Obr. 68 Samostatné steny pod uhlom s kvalitným návarom (vzorky C7, C9, C12)	65
Obr. 69 Metalografické výbrusy samostatných stien pod uhlom $45^\circ$	66
Obr. 70 Pribeh šírky samostatných stien pod uhlom $45^\circ$	66
Obr. 71 Namerané hodnoty drsnosti sada 6 stien pod uhlom $45^\circ$	67
Obr. 72 Pohľad na posledné kvalitné návary stavby (vzorka E7)	67
Obr. 73 Pohľad na výbrusy sady 6 stien pod uhlom $45^\circ$ (vzorky E3, E10, E9)	68
Obr. 74 Priemerná šírka sád 6 stien pod uhlom $45^\circ$	68
Obr. 75 Porovnanie parametru drsnosti sad 6 stien pod uhlom $45^\circ$	68
Obr. 76 Zmena skenovacej trajektórie-down skin (hore) a pôvodné hodnoty (dole)	69
Obr. 77 Pribeh šírky stien po aplikácií down skin	71
Obr. 78 Ukážka vplyvu parametru downskin	71
Obr. 79 Vyhodnotenie parametru drsnosti po aplikácií down skinu (10-pôvodné)	72
Obr. 80 Vizualizácia rozloženia porozity v objeme (vzorky X1, X2)	73
Obr. 81 Histogram výskytu defektov zistených pomocou $\mu$ Ct	73

## **11 ZOZNAM TABULIEK**

Tab. 1 Parametre zariadenia SLM280HL .....	31
Tab. 2 Označenie vzoriek na platforme 1,2 .....	38
Tab. 3 Vyhodnotenie kvality návarov pohľadom zhora platforma 1 .....	40
Tab. 4 Vyhodnotenie kvality návarov pohľadom zhora platforma 2 .....	40
Tab. 5 Namerané hrúbky stien pohľadom zhora platforma 1 .....	41
Tab. 6 Namerané hrúbky stien pohľadom zhora platforma 2 .....	41
Tab. 7 Namerané hrúbky stien pomocou metalografických výbrusov platforma 1..	42
Tab. 8 Namerané hrúbky stien pomocou metalografických výbrusov platforma 2.	42
Tab. 9 Zúžený výber kvalitných vzoriek platforma 1 .....	45
Tab. 10 Zúžený výber kvalitných vzoriek platforma 2 .....	45
Tab. 11 Užšie pole skupín procesných parametrov s drsnosťou .....	47
Tab. 12 Výpis procesných parametrov pre dobré výsledky sad 10 kolmých stien.....	62
Tab. 13 Tabuľka použitých parametrov pre down skin .....	70



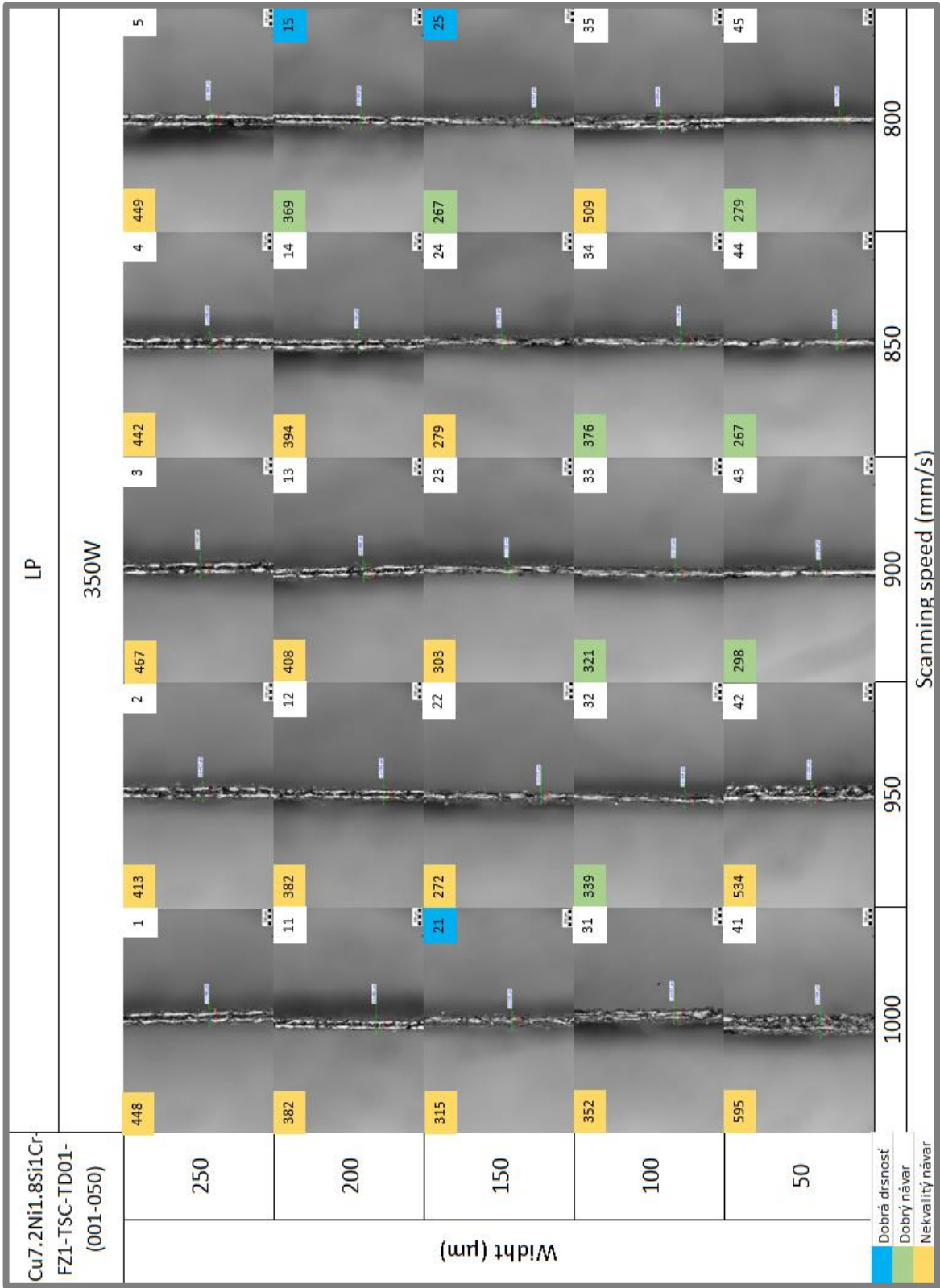
## 12 ZOZNAM PRÍLOH

12

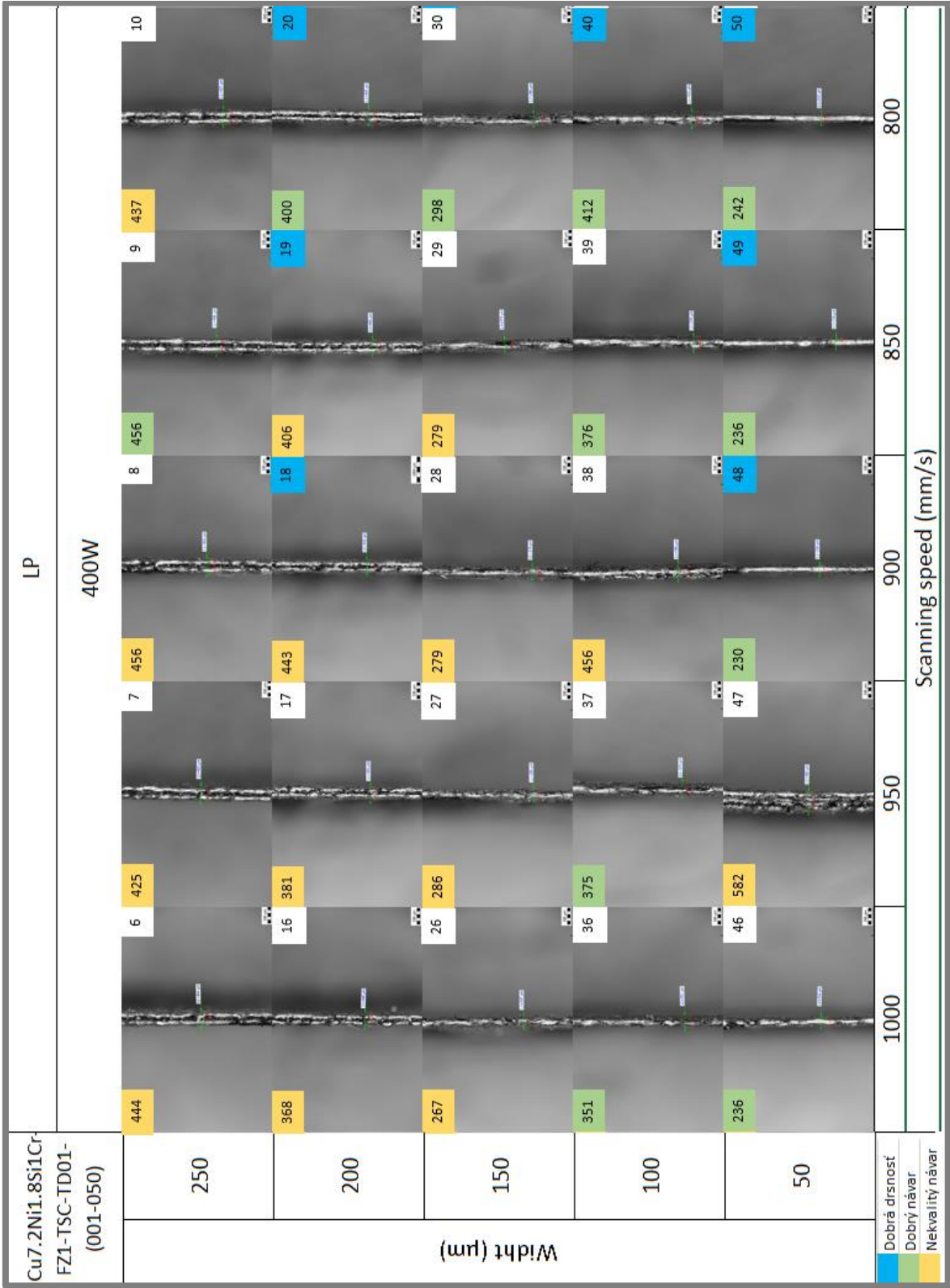
---

<b>Príloha 1</b>	Pohľad na posledný návar zhora-platforma 1, 350W	88
<b>Príloha 2</b>	Pohľad na posledný návar zhora-platforma 1, 400W	89
<b>Príloha 3</b>	Pohľad na posledný návar zhora-platforma 2, 350W	90
<b>Príloha 4</b>	Pohľad na posledný návar zhora-platforma 2, 400W	91
<b>Príloha 5</b>	Pohľad na výbrusy – defekty 1	92
<b>Príloha 6</b>	Pohľad na výbrusy – defekty 2	92
<b>Príloha 7</b>	Pohľad na výbrusy – defekty 3	92
<b>Príloha 8</b>	Pohľad na výbrusy – sady 6 stien pod uhlom 45°	93
<b>Príloha 9</b>	Protokol merania tvrdosti – Vickerse	94

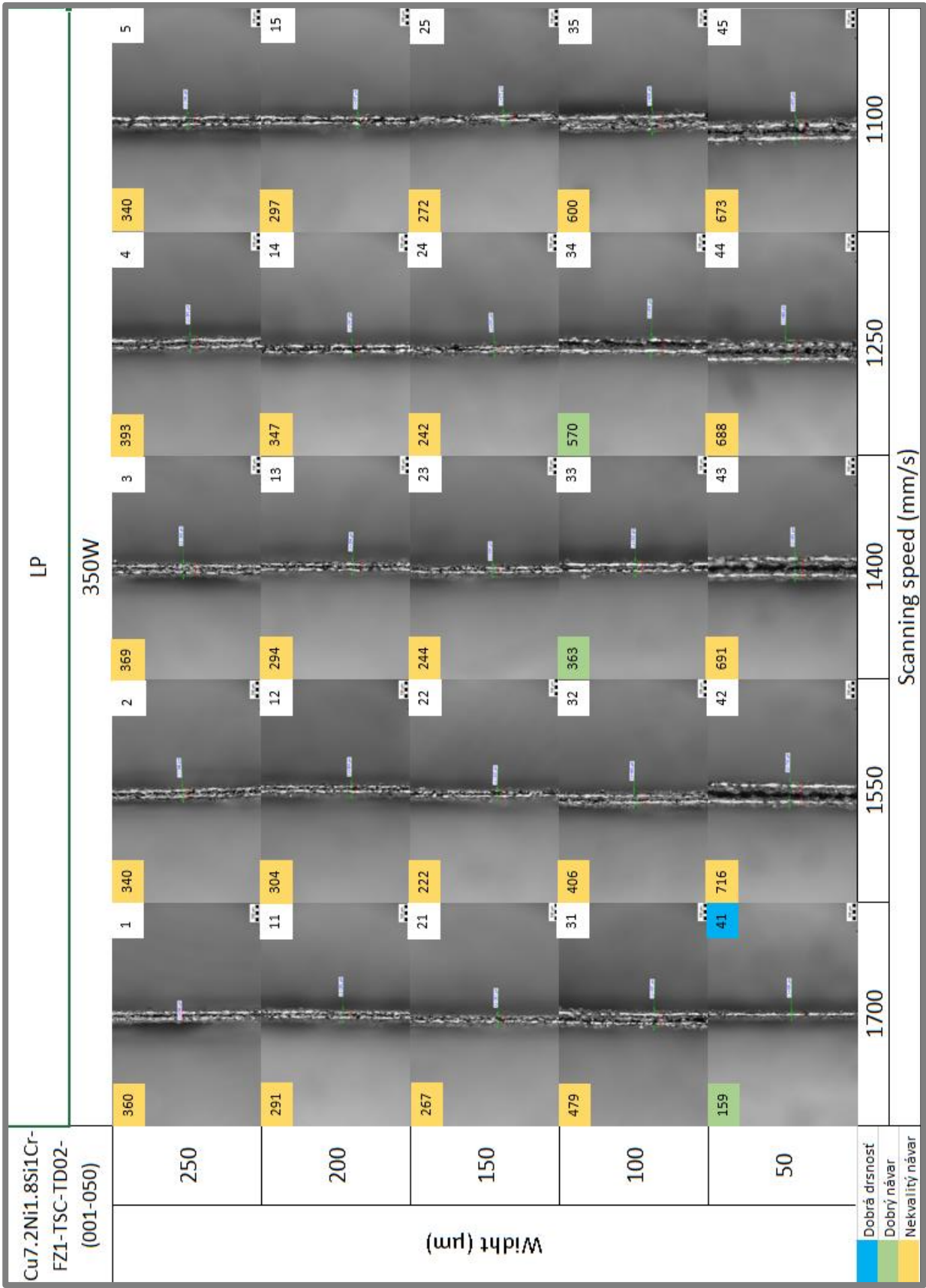
Príloha 1 Pohľad na posledný návar zhora-platforma 1, 350 W



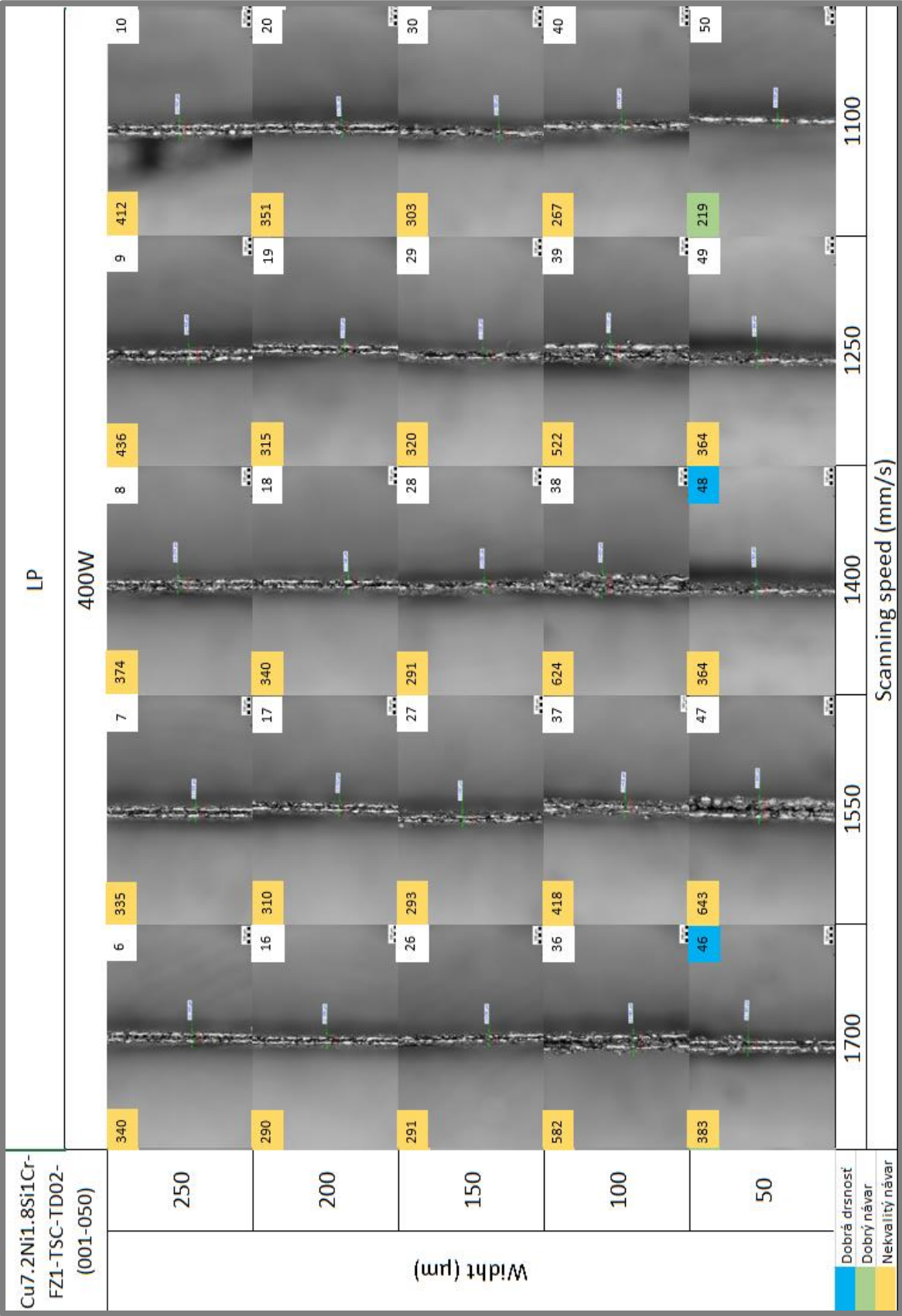
Príloha 2 Pohľad na posledný návar zhora-platforma 1, 400 W



Príloha 3 Pohľad na posledný návar zhora-platforma 2, 350 W

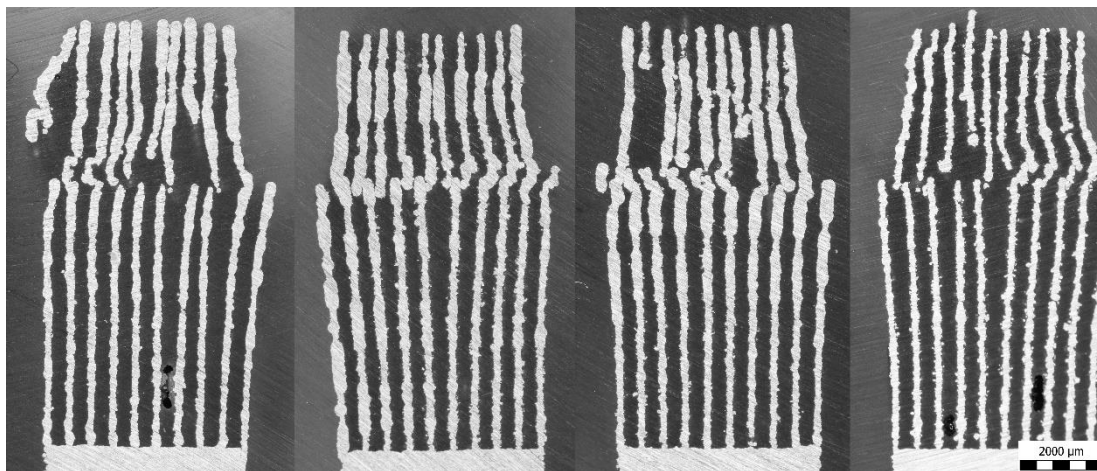


Príloha 4 Pohľad na posledný návar zhora-platforma 2, 400 W

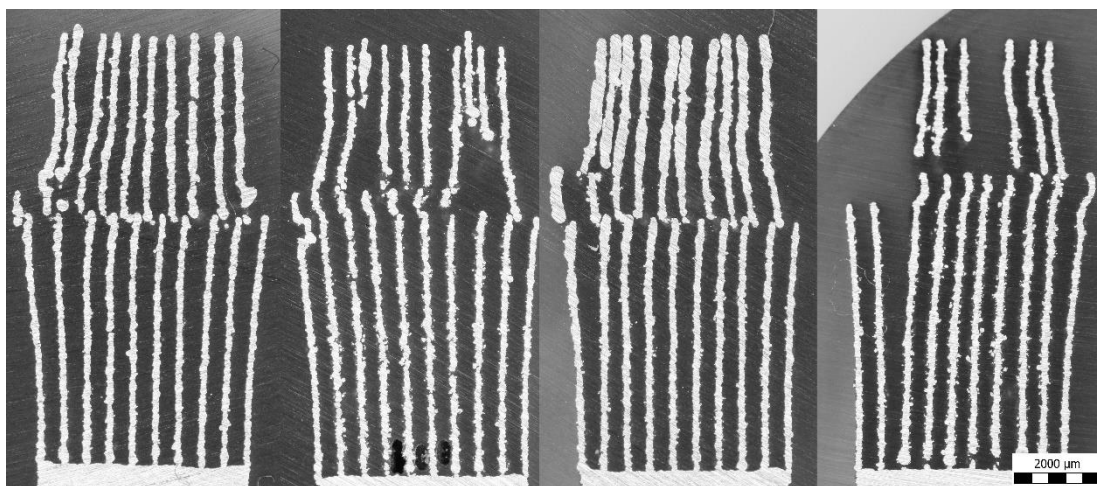




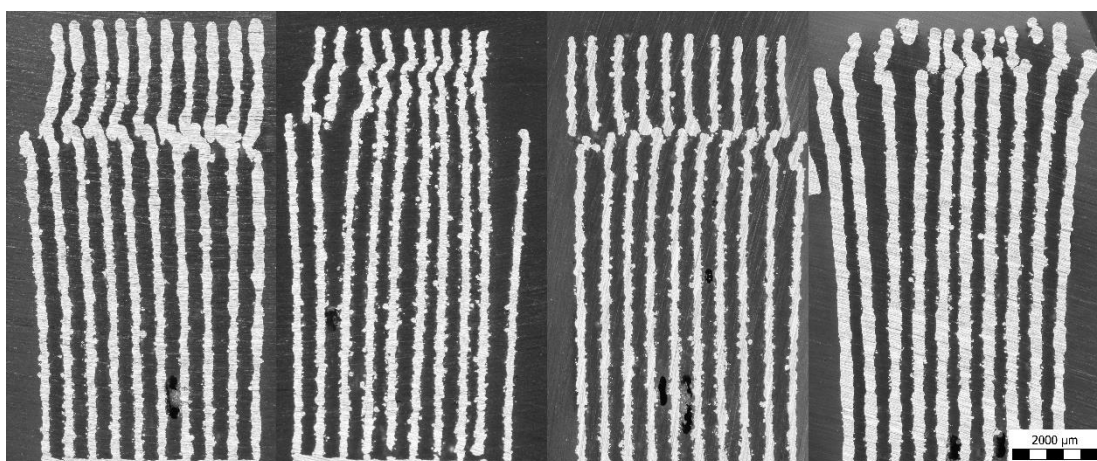
**Príloha 5** Pohľad na výbrusy – defekty 1



Obr. 82 Defekty 1 - Parametre 2 ( $L_p=400$  W,  $S_s=1700$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4

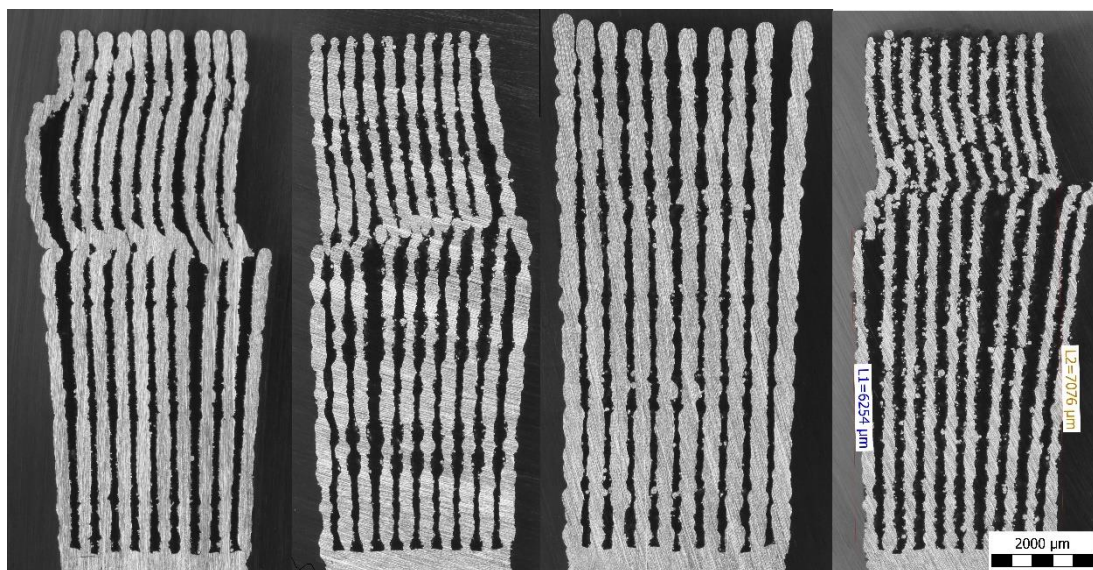


Obr. 83 Defekty 1 - Parametre 3 ( $L_p=350$  W,  $S_s=1700$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4

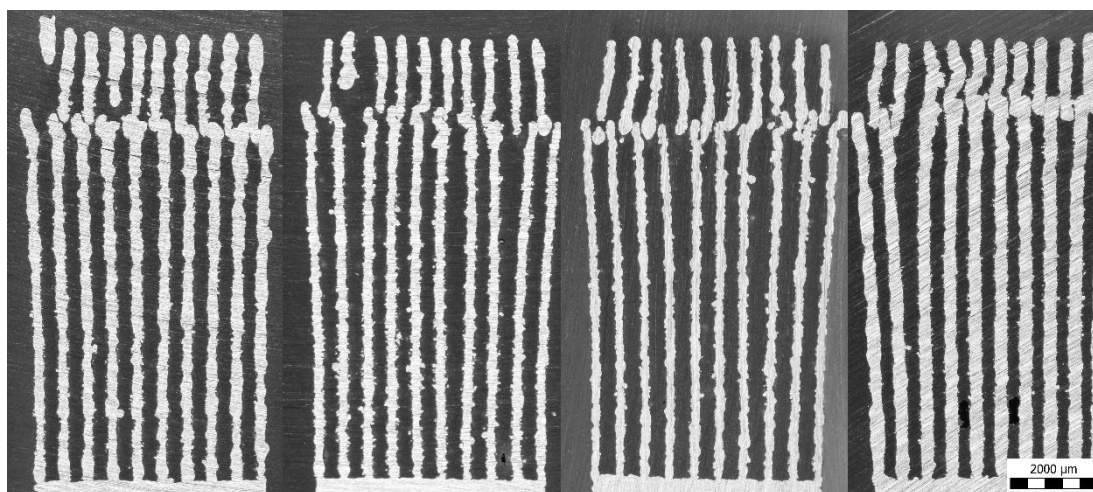


Obr. 84 Defekty 1 - Parametre 5 ( $L_p=400$  W,  $S_s=1250$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4





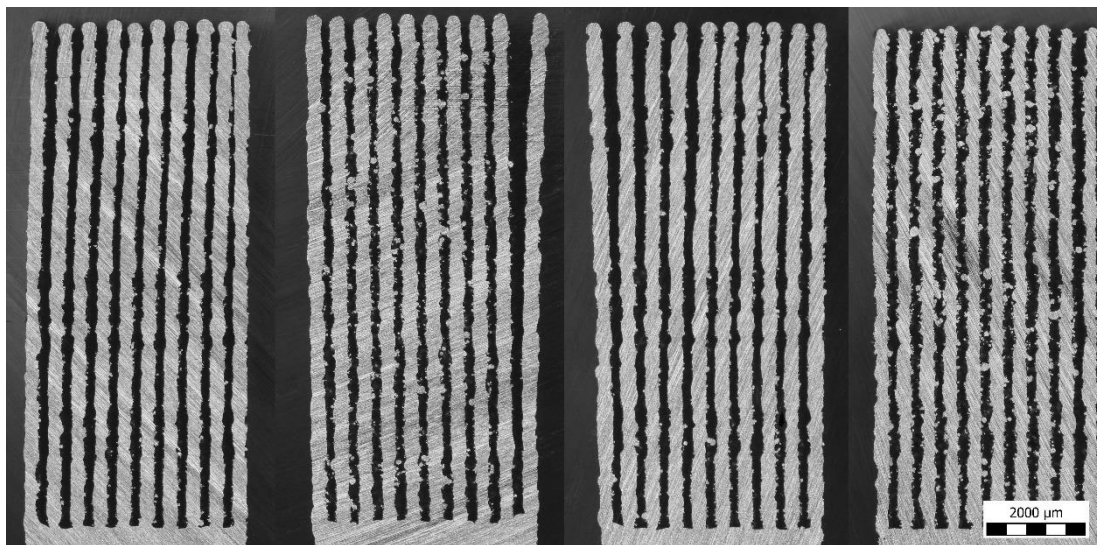
Obr. 85 Defekty 1 - Parametre 6 ( $L_p=350$  W,  $S_s=1550$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



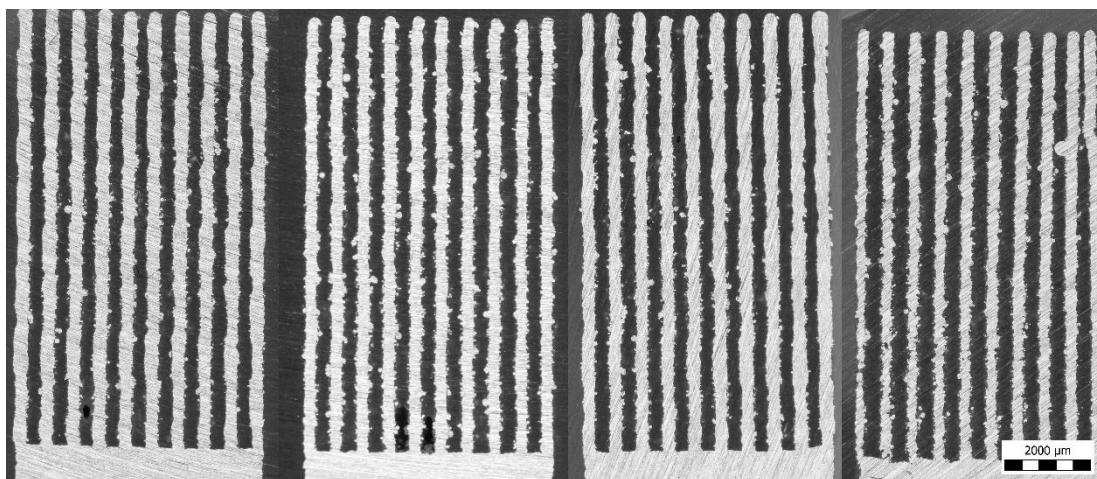
Obr. 86 Defekty 1 - Parametre 8 ( $L_p=400$  W,  $S_s=1100$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



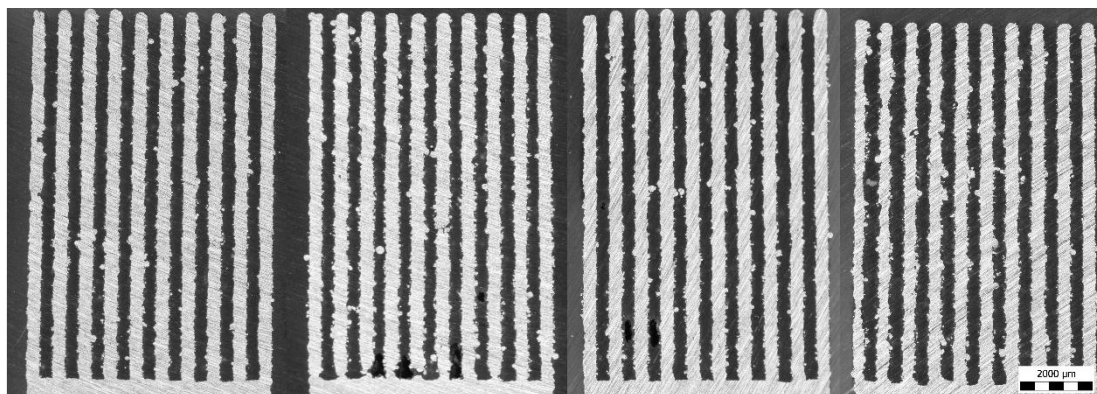
**Príloha 6** Pohľad na výbrusy – defekty 2



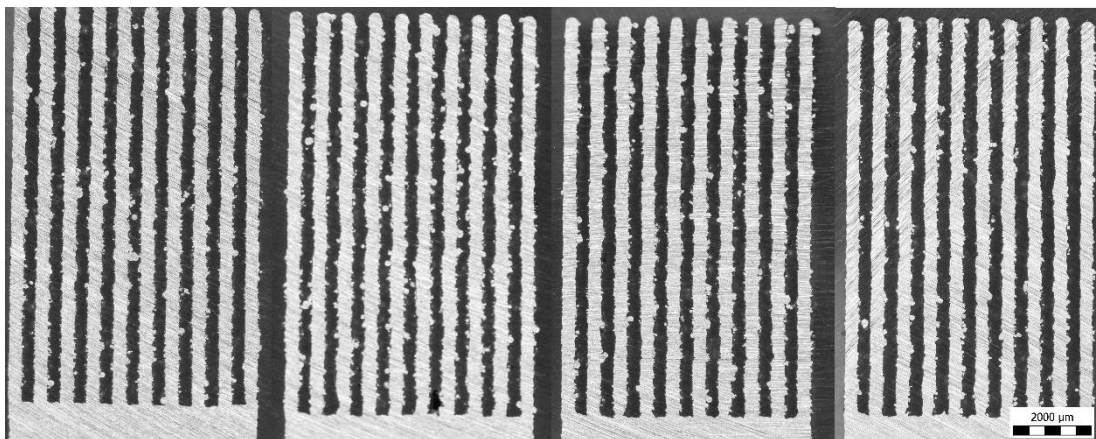
Obr. 87 Defekty 2 - Parametre 9 ( $L_p=350$  W,  $S_s=850$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



Obr. 88 Defekty 2 - Parametre 10 ( $L_p=350$  W,  $S_s=800$  mm/s,  $h_d=100\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



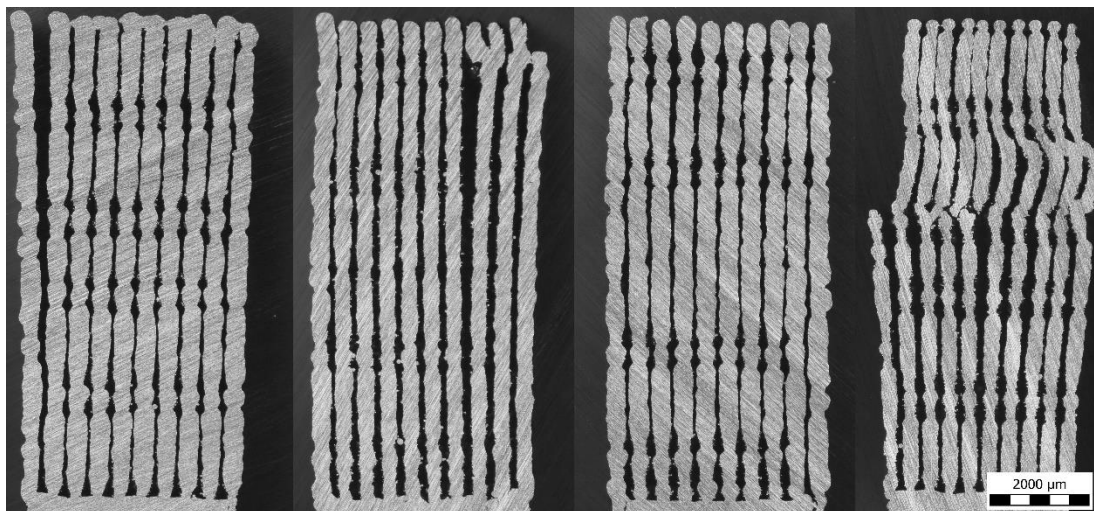
Obr. 89 Defekty 2 - Parametre 11 ( $L_p=400$  W,  $S_s=850$  mm/s,  $h_d=150\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



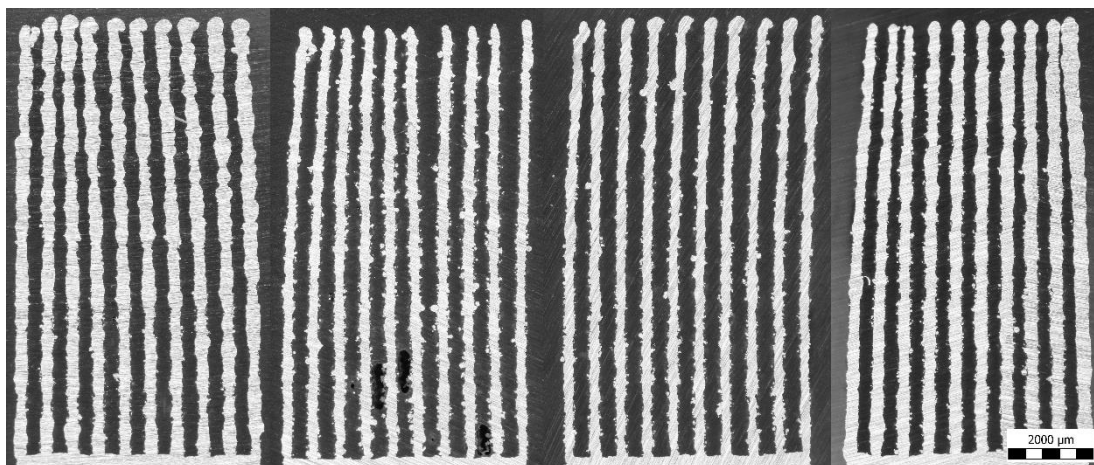
Obr. 90 Defekty 2 - Parametre 12 ( $L_p=400$  W,  $S_s=800$  mm/s,  $h_d=110\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



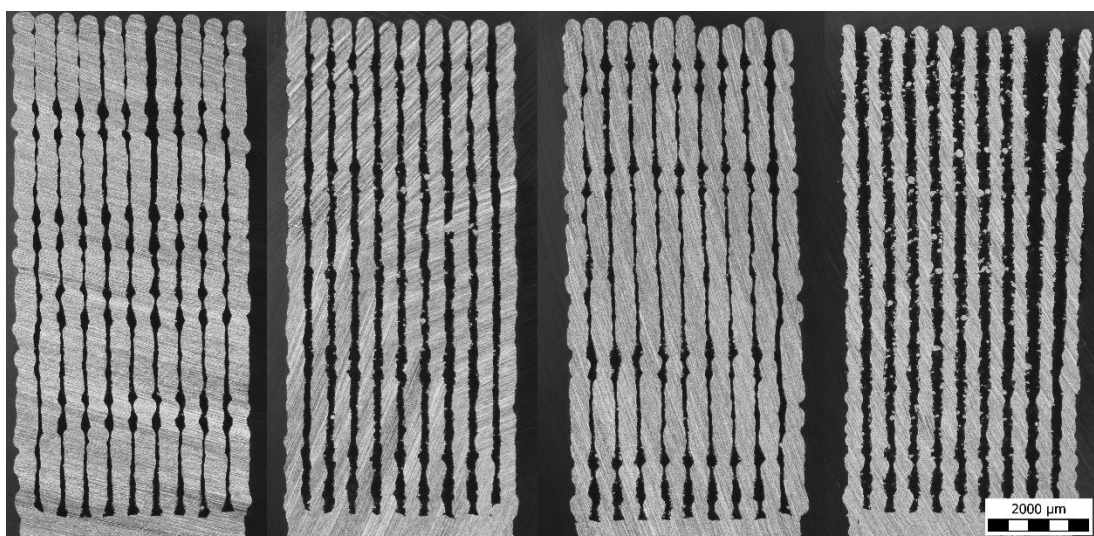
**Príloha 7** Pohľad na výbrusy – defekty 3



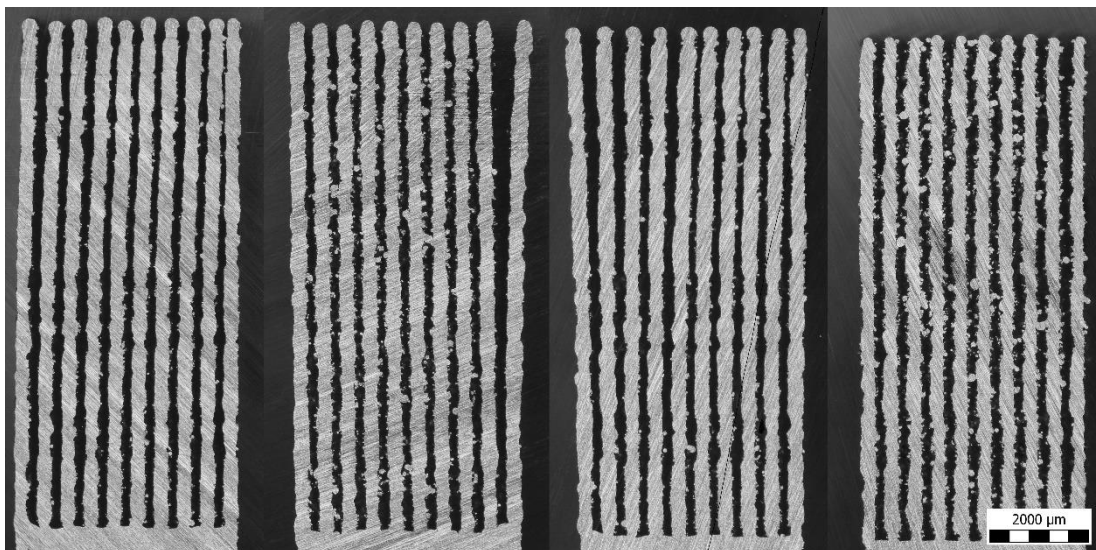
Obr. 91 Defekty 3 - Parametre 1 ( $L_p=400$  W,  $S_s=900$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



Obr. 92 Defekty 3 - Parametre 4 ( $L_p=400$  W,  $S_s=850$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



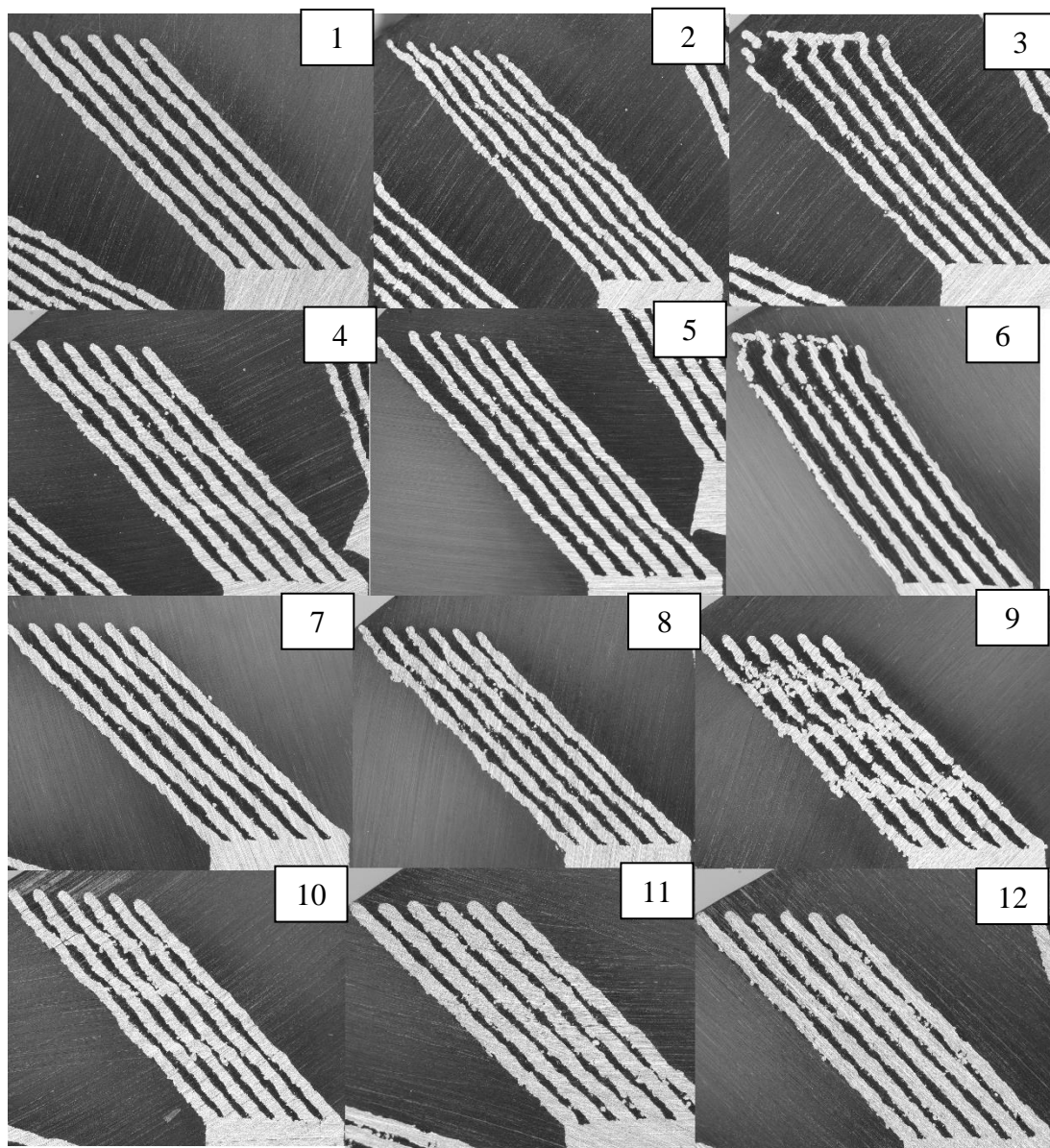
Obr. 93 Defekty 3 - Parametre 7 ( $L_p=400$  W,  $S_s=800$  mm/s,  $h_d=1\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



Obr. 94 Defekty 3 - Parametre 9 ( $L_p=350$  W,  $S_s=850$  mm/s,  $h_d=50\mu\text{m}$ ) – zľava pozícia 1, 2, 3, 4



**Príloha 8** Pohľad na výbrusy – sady 6 stien pod uhlom 45°



Obr. 95 Výbrusy sad 6 stien stavaných pod uhlom 45 s poznačenou príslušnou skupinou procesných parametrov (viz tab. 11)



**Príloha 9** Protokol merania tvrdosti – Vickerse

Laboratórny protokol č. 1

**Vyhodnotenie tvrdosti podľa Vickersa a odhad medze pevnosti materiálu**

**Použité vybavenie a materiály:**

Tvrdomer

Leco LM 247 AT

**Teória:**

Skúška podľa Vickersa prebieha vtlačovaním štvorbokého diamantového ihlana s vrcholovým uhlom  $136^\circ$  určitou silou po dobu  $t$ . Po uplynutí požadovaného času je ihlan odobratý a prechádza sa k vyhodnoteniu rozmeru vytvoreného vtlačku.

**Pracovný postup:**

*Zalievanie vzoriek*

- Umiestnenie analyzovaných vzoriek do silikónových foriem
- Zmiešanie zložiek epoxidového systému EpoThin<sup>TM</sup>2 v pomere 2:1 (resin:hardener)
- Pomalé miešanie po dobu 2 min
- Opatrné zaliatie vzoriek minimálne 2 mm nad ich vrchnú plochu

*Vakuovanie vzoriek*

- Umiestnenie vzoriek do vakuovej komory
- Po malých krokoch s pauzami znižovanie tlaku
- Pri hodnote 10 mbar zotrvanie 20-40 minút
- Vzorky vytvrdené 9 hodín na vzduchu

*Brúsenie vzoriek*

- Podľa potreby (cca 1-2mm) mokré mechanické brúsenie vzoriek brúsnym papierom s drsnosťou P180
- Postupné jemné mokré brúsenie so zmenou drsnosti brúsnych papierov – P400, P600, P1000
- Oplach isopropylalkoholom a dôkladné osušenie tlakovým vzduchom

*Meranie tvrdosti*

- Umiestnenie vzoriek do tvrdomeru
- Nastavenie požadovaného zaťaženia na zariadení – 0,3 (3N)
- Nastavenie doby vtlačovania – 10s
- na základe postupu k danému zariadeniu zmeranie požadovaných rozmerov vtisku
- Určenie tvrdosti daného materiálu normou
- Prevedenie nameranej tvrdosti na odhadovanú  $R_m$  (ISO 18265)

### Výsledky

-Záznam nameraných hodnôt tvrdosti HV0,3 s dobou vtisku 10s na 3 rozličných vzorkách.

-Použité procesné parametre: Lp=400 W, Ss=900 mm/s, Hd=90 µm, h=50 µm

1	2	3	4	5	Ø
176	178	171	183	186	179

Smerodatná odchylka = 5

-Prevedením získanej priemernej tvrdosti podľa Vickersa 179 HV0.3 je odhadovaná medza pevnosti v ťahu materiálu vyrobeného technológiou SLM 575 MPa.